

VŠB- Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Stabilizační plošina

Stabilizer Platform

Bakalář:

Martin Zmijka

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Petr Novák

Datum odevzdání:

23. 5. 2011

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy
Katedra robototechniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Zmijka**
Studijní program: B3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906R006 Mechatronické systémy
Téma: Stabilizační plošina
Stabilizer Platform

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte stávající stabilizační plošinu.
2. Navrhněte a realizujte úpravu její strojní, pohonné a senzorické části.
3. Navrhněte a odlaďte řídicí program.
4. Navrhněte a realizujte vhodné testy stability.
5. Vyhotovejte příslušnou dokumentaci.

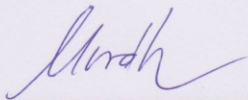
Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NOVÁK, P.: Mikropočítačové řídicí systémy. Skriptum, 2002, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, s.112, ISBN 80-248-0219-8
- [2] BALÁŤE, J.: Automatické řízení. BEN - Praha 2004, 664 s., ISBN 80-7300-148-9
- [3] MAXON MOTOR: EPOS 24-1 Hardware reference guide. Switzerland 2006, 39 s.
- [4] MAXON MOTOR: EPOS windows 32-bit DLL. Switzerland 2006, 60 s.
- [5] ŠPAČEK, P.: Návrh a realizace řízení paralelní kinematické struktury. Diplomová práce, Katedra robototechniky, VŠB-TU Ostrava, 60 s., 2007.

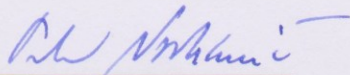
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr.Ing. Petr Novák**

Datum zadání: 17.12.2010
Datum odevzdání: 23.05.2011



prof. Dr.Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskiewicz, CSc.
prorektor pro studium



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:.....

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1988 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....

.....

Podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Zahradní 841, Rychvald, 73532

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zmijka, M. *Stabilizační plošina*. Ostrava: Katedra robototechniky VŠB-TUO, 2011. 59 s. Bakalářská práce, vedoucí: Novák, P.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicího softwaru pro stabilizační plošinu, která je paralelní kinematickou strukturou určenou primárně pro stabilizaci náklonu kamery do vodorovné polohy. V úvodu práce byla provedena analýza technických možností modelu a dosažených výsledků z předchozího řešení. Na jejím základě jsou provedeny úpravy strojní a senzorické části plošiny. Následně byl realizován její řídicí software. Na závěr byly provedeny testy chování stabilizační plošiny řízené navrženým softwarem. Výsledky testů byly pozitivní, stabilizační plošina je schopná velice rychle minimalizovat náklon kamery.

Klíčová slova: stabilizace náklonu, stabilizační plošina, řízení paralelní kinematické struktury

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

Zmijka, M. *Stabilizer Platform*. Ostrava: Department of Robotics, VŠB-Technical University of Ostrava, 2011. 59 p. Bachelor Thesis, head: Novák, P.

This bachelor thesis deals with project and implementation of a control software for the stabilizer platform. The stabilizer platform is a parallel kinematic robotic structure primary designed for stabilization of the cameras tilt into a horizontal position. At the beginning of the thesis technical possibilities of the model and the results of the previous solution were analysed. On the basis of this analysis adjustments of mechanical and sensor part of the platform were made. Subsequently, its control software was implemented. In the finally tests of the stabilizer platform controlled by the proposed software were made. The results of the tests were positive the stabilizer platform is able to minimize the cameras tilt very quickly.

Keywords: stabilization of tilt, stabilizer platform, control of parallel kinematic structure

Obsah

Seznam použitého značení.....	8
Úvod.....	9
1 Analýza stávající stabilizační plošiny	10
1.1 Stávající zařízení	10
1.2 Přehled jednotlivých komponent plošiny	12
1.3 Jednotky pro řízení motorů EPOS 24-1	12
1.4 Motory Maxon A- MAX.....	15
1.5 Akcelerometry	16
1.6 Propojení jednotek EPOS motorů a počítače	16
1.7 Chování stabilizační plošiny	17
2 Úpravy strojní části plošiny	18
3 Úpravy senzorické části plošiny	19
3.1 Výměna akcelerometrů	19
3.2 Návrh frekvenčního filtru.....	21
3.3 Popis použitých akcelerometrů	25
3.3.1 Modul ACC 7260.....	25
3.3.2 ICSensor 3100.....	26
3.4 Dovybavení plošiny gyroskopickým senzorem	27
3.5 Použití měřicí karty	29
3.6 Schéma zapojení senzorické části	30
4 Řízení plošiny	33
4.1 Automatický režim řízení plošiny	33
4.1.1 Stanovení velikosti náklonu z napětí akcelerometru	35
4.1.2 Stanovení úhlové rychlosti z napětí gyroskopu	36
4.1.3 Výpočet náklonu stabilizované plochy	36
4.1.4 Výpočet odchylek pro jednotlivé motory	38
4.1.5 Algoritmus PSD regulátoru	40
4.1.6 Hlídaní okrajových pozic.....	42
4.2 Manuální režim řízení plošiny	43
4.3 Průběh algoritmu programu	44
4.4 Popis uživatelského rozhraní.....	46
4.4.1 Řídicí rozhraní	46
4.4.2 Měřicí rozhraní	47

5	Testy chování stabilizační plošiny.....	48
5.1	Přehled dosaženého chování a technických parametrů plošiny	48
5.2	Průběh stabilizace náklonu.....	49
5.3	Test vlivu průběhu stabilizace na obraz kamery	53
5.4	Test přesnosti a průběhu stabilizace.....	54
5.5	Negativní vlastnosti plošiny	55
6	Závěr.....	56
7	Použitá literatura.....	58
	Příloha A	59

Seznam použitého značení

$b_{\min}, b_{\text{skut}}$	pomocné koeficienty pro návrh frekvenčního filtru [-]
C_1, C_2	hodnoty kondenzátorů frekvenčního filtru [μF]
C	střední hodnota kapacity [F]
C_{1°	konstanta citlivosti změny napětí akcelerometru při jeho pootočení o 1° [V]
$C_{1^\circ/\text{s}}$	konstanta citlivosti změny napětí gyroskopu při změně rychlosti jeho otáčení o $1^\circ/\text{s}$ [V]
$e(kT)$	odchylka stabilizované plochy od rovnovážné polohy v diskrétním čase [mm]
f_0	horní mezní frekvence [Hz]
$G(s)$	přenos v oblasti komplexní proměnné
i	softwarová proměnná pro ukládání hodnoty integrace
K_p	konstanta zesílení PSD regulátoru
LAFCH	logaritmicko-amplitudová frekvenční charakteristika
O_p, P_p, Q_p	body stabilizované plochy v souřadném systému plošin
O_z, P_z, Q_z	obrazy bodů O_p, P_p, Q_p v souřadném systému základny
O_v, P_v, Q_v	velikosti vektorů $\mathbf{o}, \mathbf{p}, \mathbf{q}$ [mm]
$\mathbf{o}, \mathbf{p}, \mathbf{q}$	vektory vzniklé mezi body O_p, P_p, Q_p a O_z, P_z, Q_z
Q	činitel jakosti frekvenčního filtru [-]
R_1, R_2	hodnoty rezistorů frekvenčního filtru [Ω]
R	střední hodnota odporu [Ω]
R_α	matice charakterizující rotaci okolo osy X
R_φ	matice charakterizující rotaci okolo osy Y
T	doba jednoho cyklu programu [ms]
T_I	integrační časová konstanta PSD regulátoru
T_D	derivační časová konstanta PSD regulátoru
TM	transformační matice
U_m	aktuální měřené napětí snímačů [V]
U_{0g}	hodnota napětí akcelerometru pro vodorovnou polohu [V]
$U_{0\omega}$	hodnota napětí gyroskopu pro nulovou úhlovou rychlost [V]
$u(kT)$	akční veličina motorů v diskrétním čase [ot/min]
α	úhel náklonu stabilizované plochy okolo osy X [$^\circ$]
α_k	korigovaný úhel náklonu plošiny [$^\circ$]
$\alpha(kT)$	úhel náklonu stabilizované plochy okolo osy X v diskrétním čase [$^\circ$]
φ	úhel náklonu stabilizované plochy okolo osy Y [$^\circ$]
$\varphi(kT)$	úhel náklonu stabilizované plochy okolo osy Y v diskrétním čase [$^\circ$]
ω_x	úhlová rychlost rotace plošiny okolo osy X [$^\circ/\text{s}$]
$\omega_x(kT)$	úhlová rychlost rotace plošiny okolo osy X v diskrétním čase [$^\circ/\text{s}$]
ω_y	úhlová rychlost rotace plošiny okolo osy Y [$^\circ/\text{s}$]
$\omega_y(kT)$	úhlová rychlost rotace plošiny okolo osy Y v diskrétním čase [$^\circ/\text{s}$]

Úvod

Stabilizační plošina je robotická konstrukce schopná neustále udržovat vodorovnou polohu stabilizované plochy. Primární využití nalézá při minimalizaci náklonu videokamery či fotoaparátu. Plošinu lze využít všude tam, kde vzniká potřeba mít jednu plochu neustále ve vodorovné poloze se zemským povrchem, nebo pod definovaným sklonem vůči zemskému povrchu.

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh a realizace řídicího algoritmu schopného stabilizaci zajistit. Stabilizační plošina je existující reálné zařízení vyvinuté v rámci diplomové práce „Návrh a realizace řízení paralelní kinematické struktury“ Petra Špačka viz [1].

V úvodu je provedena analýza technických možností a dosažených výsledků předchozího řešení. V další části se práce zabývá návrhem a realizací úprav strojního a senzorického subsystému plošiny za účelem dosažení lepšího dynamického chování a technických možností plošiny.

Hlavní část bakalářské práce popisuje návrh a realizaci jejího řídicího softwaru. Pro pohyby stabilizované plochy slouží elektropohony v kombinaci s řídicími jednotkami EPOS 24-1, jejich výhodou je schopnost zajištění celkové kinematiky pohonu. Jednotky EPOS 24-1 jsou konstruovány jako podřízené jednotky řídicímu počítači. Výrobce k tvorbě řídicí aplikace dodává knihovnu příkazu „Win 32 bit DLL“ viz [2] schopnou zajistit komunikaci a řízení pohonu v předpřipravených módech. Celý řídicí software je napsán ve vývojovém prostředí Visual Basic 2008.NET. Vyvinutý algoritmus programu zajišťuje řízení stabilizační plošiny ve dvou módech a to v automatickém a manuálním. Automatický mód řízení zajišťuje vodorovnou polohu stabilizované plochy okamžitě při náklonu robotické konstrukce okolo osy rotace. Manuální pak umožňuje provádět libovolné pohyby se stabilizovanou plochou a zajistit tak její libovolnou polohu.

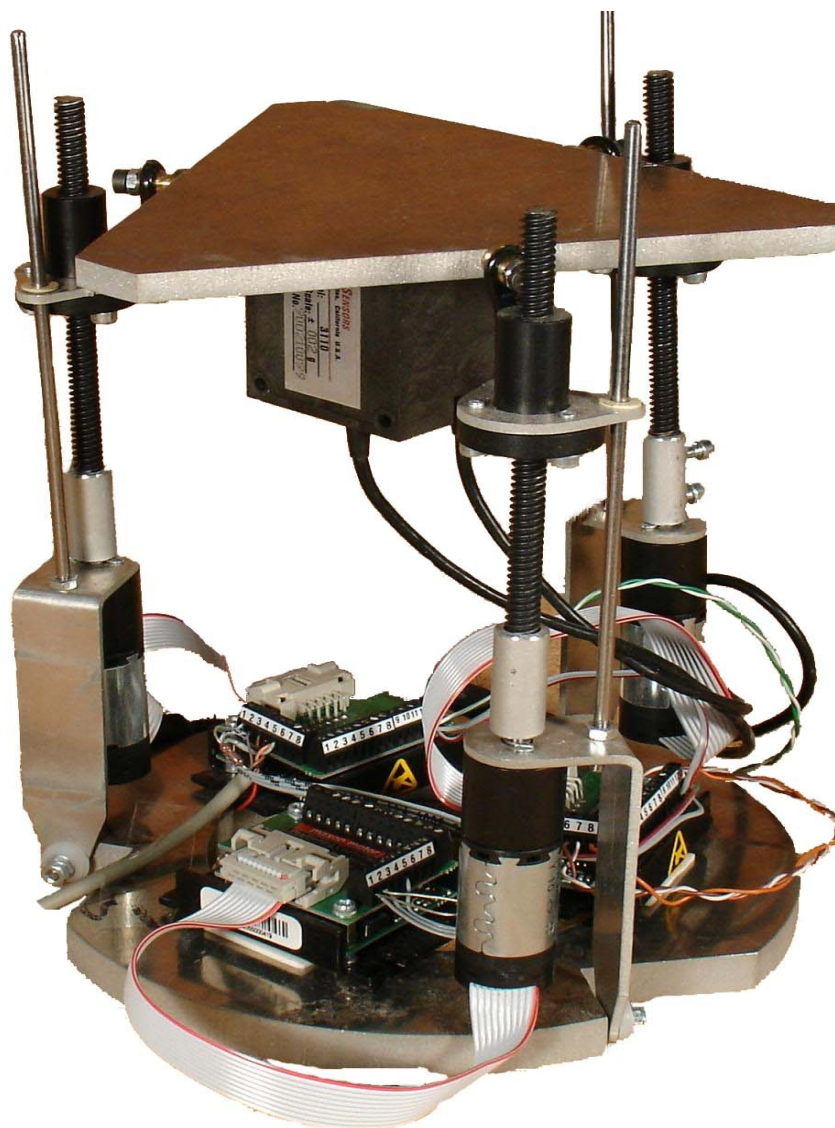
Poslední část práce se zabývá testy a pozorováním chování stabilizační plošiny. Jsou provedeny dva druhy testů. První zkoumá průběh náklonu základny plošiny a její stabilizované plochy během regulace, druhý pak vzhled obrazu kamery stojící na plošině během stabilizace.

1 Analýza stávající stabilizační plošiny

Analýza je provedená na základě poznatků získaných z diplomové práce „Návrh a realizace řízení paralelní kinematické struktury“ jejího autora Petra Špačka viz [1]. Jako další zdroj byly použity dostupné informace od výrobců jednotlivých komponentů plošiny.

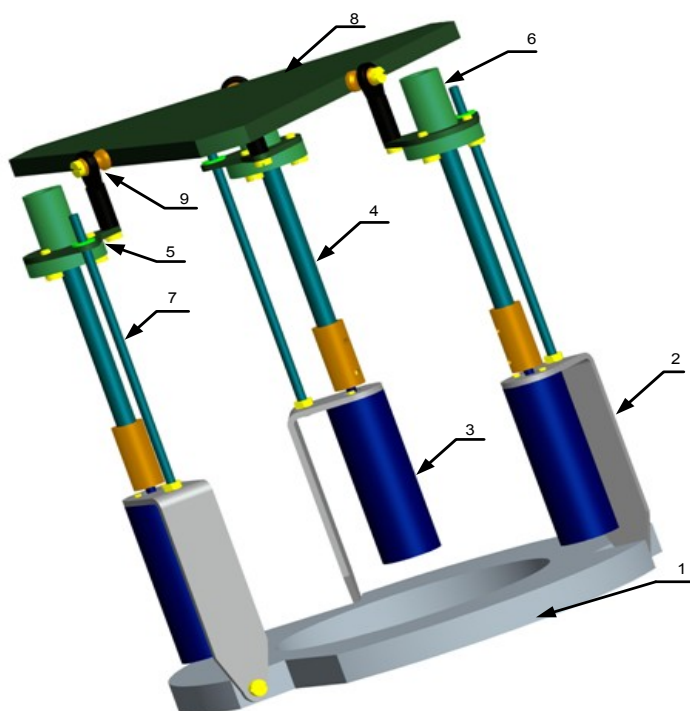
1.1 Stávající zařízení

Stabilizační plošina viz *Obr. 1.1* je realizovaná jako paralelní kinematická struktura. Její funkce spočívá ve stabilizaci náklonu kamery do vodorovné polohy. Stabilizace se provádí ve dvou osách rotace a to okolo osy X a Y. Nosnost je navržena pro kameru do hmotnosti cca 0,5 kg.



Obr. 1.1 Stabilizační plošina

Konstrukčně se zařízení skládá s několika dílů, jak ukazuje *Obr. 1.2*. První z nich nepohyblivá základna (1), která nese a spojuje paralelní strukturu v jeden celek a jsou k ní přichyceny držáky motorů (2). Klíčovou částí celého zařízení je sestava složená z motoru, (3) pohybového šroubu (4) a pohybové matice (6). Mechanismus vytvořený těmito komponenty zajišťuje pohyb stabilizované plochy (8). Neméně důležitou součástí je držák pohybové matice (5) a pohybový kloub (9), který spojuje pohon se stabilizovanou plochou. V neposlední řadě je také důležitou součástí vodící tyč (7) sloužící pro zajištění lineárního posuvu.



Obr. 1.2 Konstrukční uspořádání plošiny

1	Pevná základna
2	Držák motoru
3	Motor
4	Pohybový šroub
5	Držák pohybové matice
6	Pohybová matice
7	Vodící tyč
8	Stabilizovaná plocha
9	Pohybový kloub

Tab. 1.1 Legenda k Obr. 1.2

1.2 Přehled jednotlivých komponent plošiny

Zařízení bylo sestaveno z dílů dostupných na Katedře robototechniky VŠB-TUO. Přehled dílů je uveden v *Tab. 1.2*.

Pohony	DC motor MAXON A-MAX 19 2.5W 249993
Převodovka	Planetová GB 19B 149043
Řídicí jednotky	EPOS 24-1
Pohybový šroub s maticí	Kerk BF4M 03T.48
Akcelerometry	ICSensor 3100

Tab. 1.2 Komponenty stabilizační plošiny

1.3 Jednotky pro řízení motorů EPOS 24-1

Zdrojem níže uvedených informací je firemní literatura firmy Maxon motor a.g., tyto informace jsou rovněž uvedeny v [3], [4] a [5].

EPOS 24-1 je řídicí jednotka:

- pro řízení kartáčových DC motorů s permanentními magnety vybavených inkrementálním snímačem otáček
- pro řízení elektronicky komutovaných EC motorů vybavených Halovými sondami a inkrementálním snímačem se sinusovým průběhem proudu.

Jednotka je určena pro motory o výkonu do 24 W. Pro DC a EC motory se jednotky od sebe nepatrně liší počtem a typy konektorů pro připojení kabelů. Na *Obr. 1.3* je vyobrazena jednotka EPOS 24-1 v provedení pro DC motory včetně technických parametrů viz *Tab. 1.3*.



Obr. 1.3 EPOS 24-1 pro DC motory

Napájecí napětí V_{cc} :	9 - 24 V
Max. výstupní proud I_{max} krátkodobý:	2 A
Výstupní proud trvalý:	1 A
Vzorkovací frekvence polohového PID reg.	1 kHz
Max. rychlost (2-pólové motory) :	25000 ot/min
Analogové vstupy:	2 analogové vstupy 10-bit. rozlišení 0 - 5 V
Digitální vstupy:	6 digitálních vstupů
Komunikační rozhraní:	RS232, CAN

Tab. 1.3 Technické parametry EPOS 24-1

EPOS 24-1 disponuje několika předpřipravenými módy řízení motoru. Následně je uveden jejich stručný popis. Detailní informace o předpřipravených módech řízení je možno nalézt v [5].

Homing mód: používá se pro počáteční inicializaci pohonu a nalezení výchozí pozice. K dispozici je připraveno několik metod jak inicializaci provést. Všechny metody vycházejí ze dvou základních myšlenek:

1. Na trase pohybu je připevněn koncový spínač a motor pak jede tak dlouho, dokud řídicí jednotka nezaznamená jeho impulz.
2. Využívá se nárůstu odebíraného proudu, když dojede ke koncové překážce a snaží se v pohybu pokračovat.

Poziční mód: slouží pro polohové řízení motoru. Uživatel zde zadává jednotce hodnotu žádané pozice a to přímo pozičnímu regulátoru. Není použit generátor průběhu pohybu.

Poziční mód s generátorem trajektorie pohybu: je podobný pozičnímu módu s tím rozdílem, že je zde využito generátoru trajektorie pohybu. Uživatel si může nastavit parametry pohybu, jako je maximální zrychlení, zpomalení a rychlost pohybu na zadanou pozici. Generátor pak hodnotu pozice zadává samotnému polohovému regulátoru. Výhodou tohoto módu je možnost volby mezi pohybem na absolutní či relativní pozici, případně zda se má pohyb provádět okamžitě po zadání žádané hodnoty, nebo počkat na dokončení předchozího pohybu.

Rychlostní mód: slouží pro řízení otáček motoru. Je obdobou pozičního módu. Hodnota otáček je zde zadávána jako žádaná hodnota přímo rychlostnímu regulátoru pohonu.

Rychlostní mód s generátorem trajektorie rychlosti: v tomto módu je možno nastavit parametry pohybu jako jsou maximální zrychlení, zpomalení a maximální otáčky motoru. S hodnotami pak pracuje generátor trajektorie rychlosti a zadává hodnotu žádaných otáček regulátoru rychlosti pohonu.

Step direction mód: zde je možnost motor použít jako krokový. Spolupracuje se dvěma digitálními vstupy jednotky, kdy jeden vstup slouží pro impulzy signalizující krok motoru a druhý vstup udává směr otáčení pomocí hodnoty logického signálu.

Master enkodér mód: slouží k využití externího enkodéru. Spolupracuje se dvěma digitálními vstupy, které nahrazují kanál A a B pro externí enkodér.

Proudový mód: dal by se nazvat také momentovým módem. Uživatel v něm zadává jednotce hodnotu proudu procházejícího do motoru.

Nutno dodat, že EPOS 24-1 jsou konstruovány jako podřízené jednotky řídicímu počítači, který jim zadává příkazy. Možností ovládaní mají několik. Jednou z nich je možnost využití uživatelského rozhraní dodávaného výrobcem. Další možností, pro lepší optimalizaci aplikace je vhodné si vytvořit vlastní řídicí software. K tomuto účelu výrobce dodává knihovny příkazů pro programovací jazyky Visual Basic, Delfi, C++ a Lab View. Komunikace mezi řídicím softwarem a jednotkami EPOS probíhá po sériovém rozhraní RS232, kdy jedna jednotka komunikuje přímo s nadřazeným počítačem a tvoří zároveň vstupní bránu na sběrnici CAN, pomocí které komunikují jednotky EPOS mezi sebou. V jedné aplikaci může být spolu takto propojeno až 127 jednotek EPOS 24-1.

1.4 Motory Maxon A- MAX

Motory Maxon A- MAX 19 24933, v kombinaci s převodovkou a inkrementálním snímačem otáček (enkodérem), slouží pro pohyby se stabilizovanou plochou. Představují tedy nohy paralelní kinematické struktury. Přehled technických parametrů je uveden v Tab. 1.4. Detailní informace o použitých pohonech je možno nalézt na přiloženém CD v přílohách *motor.pdf* a *převodovka.pdf*.

Motor	
Napájecí napětí V_{cc}	6 V
Rychlost v nezatíženém stavu	12100 ot/min
Odebíraný proud v nezatíženém stavu	113 mA
Maximální rychlost v zatíženém stavu	8530 ot/min
Maximální moment trvalý	2,76 mNm
Maximální odebíraný proud trvalý	0,720A
Převodovka	
Převodový poměr	29:1
Inkrementální snímač otáček	
Počet kanálů	2
Počet pulzů na otáčku	512

Tab. 1.4 Technické parametry sestavy motoru

Pro připojení motoru na jednotku EPOS se využívá integrovaný kabel dodávaný výrobcem. Obsahuje vodiče pro napájení motoru a jednotlivé kanály snímače otáček.

1.5 Akcelerometry

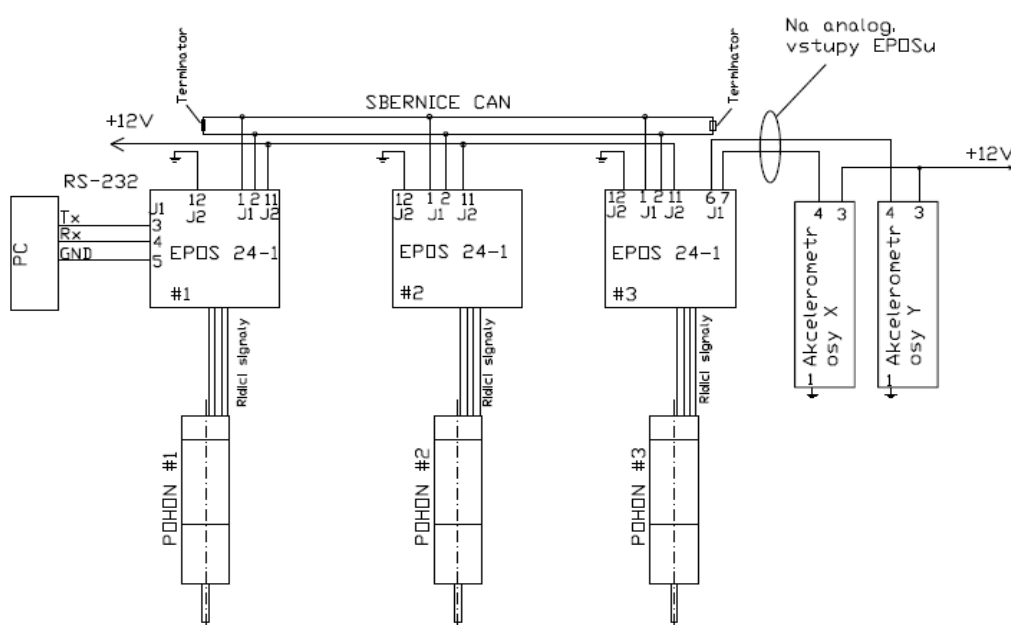
Za účelem snímání náklonu plošiny jsou použity dva jednoosé akcelerometry ICSensor 3100. Pomocí nich se měří gravitační zrychlení země, které je proměnné v závislosti na úhlu naklonění plošiny okolo osy rotace. Jejich výstupní veličinou je analogové napětí. Snímač je pak připojen na A/D převodník a jeho hodnota v digitální podobě je dále zpracovávána a vyhodnocovaná v řídicím software. Měřené zrychlení se udává v násobcích gravitačního zrychlení g. Přehled technických parametrů akcelerometru je uveden v Tab. 1.5. Detailní informace o použitém akcelerometru pak v jeho katalogovém listu [6 s. 28 - 29].

Napájecí napětí:	8-30 V
Rozsah:	± 2 g
Citlivost:	1000 mV/g
Napětí pro 0 g:	2500 mV
Rozsah výstupního napětí:	500 - 4500 mV

Tab. 1.5 Technické parametry akcelerometru ICSensor 3100

1.6 Propojení jednotek EPOS motorů a počítače

Plošina je konstruována na napájecí napětí 9-24 V. Pro dobrou dynamiku modelu je vhodné zajistit napájecí zdroj schopný rázově dodat až 6 A. Jednotlivé pohony při rychlé reakci mohou mít spotřebu až 2 A na jeden pohon. Vhodná je například autobaterie. Schéma elektrického zapojení je znázorněno na Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Schéma zapojení řídicího obvodu stabilizační plošiny

Analogovou část zapojení tvoří dva jednoosé akcelerometry připojené na analogové vstupy jednotky s A/D převodníkem. Zbytek obvodu tvoří digitální část, do které jsou zahrnuty komunikační sběrnice RS232 a CAN. RS232 slouží pro zajištění toku dat mezi plošinou a řídicím počítačem. Sběrnice je připojena na první z jednotek EPOS, která zároveň tvoří vstupní bránu na sběrnici CAN. Po této sběrnici se provádí komunikace mezi jednotkami. RS232 a CAN jsou běžně používanými standardy v průmyslu. Nepatrným problémem je propojení jednotek s počítačem, neboť integrovanými sériovými porty jsou dnes běžné počítače vybaveny jen zřídka, proto je nutné používat převodník z RS232 na USB, kterým jsou dnes počítače standardně vybaveny. Komunikační rychlost sběrnice RS 232 dosahuje 115 kbit/s. Plošinu lze propojit s počítačem i přímo přes CAN sběrnici použitím přídatné karty. Toto řešení je ale poněkud dražší, ovšem komunikační rychlost sběrnice CAN je znatelně větší než u sběrnice RS232, a to 1Mbit/s.

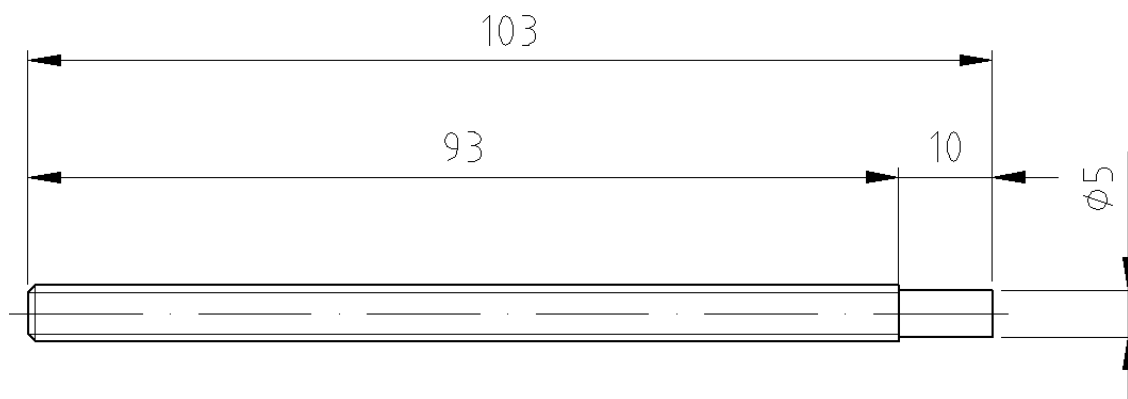
1.7 Chování stabilizační plošiny

K stabilizační plošině byl jejím konstruktérem vyvinut také řídicí software. Jeho výsledkem byla dobře probíhající stabilizace pro větší náklony. V menších náklonech plošina vykazuje menší akční veličinu a stabilizace tak není optimální. Úkolem mé bakalářské práce je navrhnout řídicí software, který bude vykazovat dobré řízení v celé oblasti náklonu.

2 Úpravy strojní části plošiny

Stojní část plošiny je tvořena převážně jejím pohybovým ústrojím, které se skládá z elektropohonu, pohybového šroubu a pohybové matice. Po analýze stojní částí plošiny jsem usoudil, že není potřeba žádných větších úprav, které by zasahovaly do její konstrukce. Jako jedinou úpravu jsem realizoval výměnu pohybových šroubů, a to z důvodu zrychlení dynamiky plošiny. Původní šrouby měly stoupání závitů 3 mm/ot. Při tomto stoupání, rychlosti motoru 8000 ot/min a převodovém poměru použité převodovky 1:29, je pohybová matice schopna urazit dráhu 14 mm/s. Jelikož jeden z požadavků na stabilizaci je, aby se prováděla co nejrychleji, zvolil jsem pohybový šroub s dvojnásobným stoupáním tedy 6 mm/ot. Vzhledem aktuální nedostupnosti vybraného typu, byla volba změněna a objednal se dostupný typ se stoupáním 10 mm/ot. Plošina s tímto šroubem je tedy schopna dosáhnout rychlosti posuvu až 45mm/s, což by mělo zaručit dostatečnou rychlost pohybu.

Vybraný pohybový šroub se dodával jako jedna celistvá závitová tyč. Bylo nutné ji tedy rozřezat na tři části a opracovat konce tak, aby se daly připevnit na hřídel motoru. Opracovaný konec je zasunut do mezikusu, který slouží ke spojení pohybového šroubu s hřídelí, viz *Obr. 2.2*. Rozměry upraveného šroubu jsou patrné z *Obr. 2.1*.



Obr. 2.1 Obrobený pohybový šroub



Obr. 2.2 Pohybový šroub s osazeným mezikusem pro připevnění na hřídel motoru

3 Úpravy senzorické části plošiny

Senzorická část plošiny je tvořena dvěma jednoosými akcelerometry ICSensor 3100. Akcelerometry jsou využity pro měření velikosti gravitačního zrychlení země, které je proměnné v závislosti na úhlu natočení okolo osy rotace plošiny. Tento jev je využit pro získání velikosti náklonu okolo os rotace. Použité senzory mají měřicí rozsah ± 2 g. Vzhledem k horší schopnosti plošiny rozeznávat malé náklony, jsem jako úpravu senzorické části navrhl použít akcelerometr s menším měřicím rozsahem a tudíž s větší rozlišitelností.

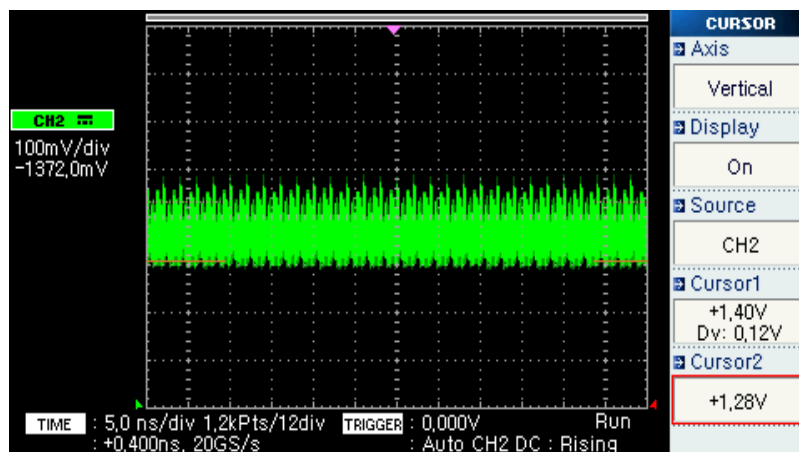
3.1 Výměna akcelerometrů

Výměna snímače byla realizována pro zlepšení rozlišitelnosti malých náklonů plošiny. Pro výměnu byl zvolen dostupný modul tříosého akcelerometru ACC 7260 s nastavitelným měřicím rozsahem viz [7]. Jedna z možností nastavení rozsahu je $\pm 1,5$ g, což by mělo zaručit větší rozlišitelnost pro malé náklony. Z hlediska výstupního napětí akcelerometru je jeho citlivost při tomto měřicím rozsahu 800 mV/g.



Obr. 3.1 Modul tříosého MEMS akcelerometru ACC7260

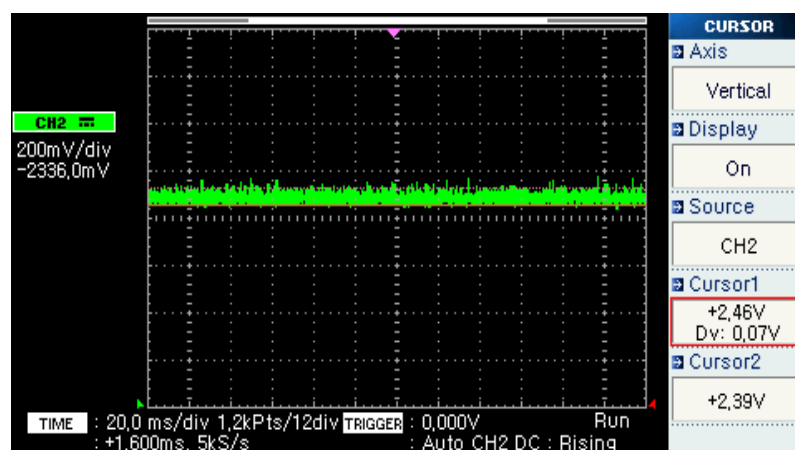
Akcelerometr byl tedy na plošinu nainstalován. Bohužel se ukázal jako velice náchylný na rušení vznikající v motorech plošiny. Po připojení do řídicího obvodu plošiny se na jeho výstupní napětí naindukovalo, přes napájecí obvod, rušení z motorů a signál nesoucí informaci o náklonu byl značně znehodnocen viz Obr. 3.2. V případě odpojení motorů od napájení, se vliv rušení značně snížil. Na výstupním napětí snímače se projevil pouze šum samotného akcelerometru.



Obr. 3.2 Výstupní napětí akcelerometru ACC7260

Po digitalizaci signálu z Obr. 3.2 byly měřené hodnoty velice nestabilní. Jejich rozptyl dosahoval až 120 mV. Při přepočtu měřené hodnoty gravitačního zrychlení na úhel náklonu dosahovala chyba až $\pm 6^\circ$. Ze získaných poznatků jsem usoudil, že použití akcelerometru ACC 7260 je naprosto nevhodné pro přesné měření náklonu a tedy i řízení stabilizační plošiny.

Jako řešení jsem proměřit původní akcelerometry ICSensor 3100 [6 s. 28 - 29], které se projeví jako podstatně méně náchylné na rušení z motorů. viz Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Výstupní napětí akcelerometru ICSensor 3100

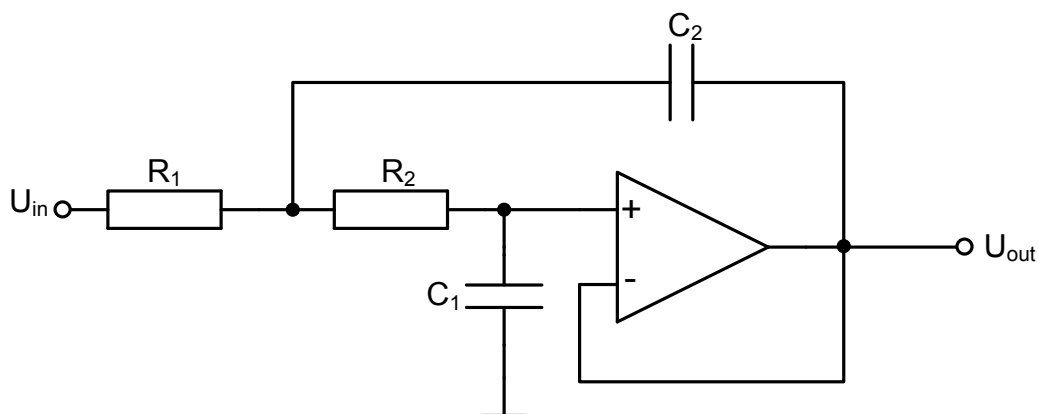
Další pozitivní vlastností akcelerometrů ICSensors 3100 je větší napěťová rozlišitelnost měřeného zrychlení a to 1200 mV/g. Na základě těchto poznatků jsem usoudil, že původní akcelerometry vykazují lepší vlastnosti pro použití v této aplikaci a provedl jsem jejich zpětnou instalaci na plošinu.

Rušení naindukované na výstupním signálu z akcelerometrů stále způsobovalo značné chyby v jeho digitalizaci. Jako řešení těchto chyb byl realizován frekvenční filtr typu dolní propust, který by měl tyto rušivé složky napětí z velké části odstranit.

3.2 Návrh frekvenčního filtru

Frekvenční filtr typu dolní propust byl navržen s horním mezním kmitočtem $f_0=50$ Hz. Při výběru jeho typu bylo voleno optimálně mezi složitostí návrhu filtru a složitostí jeho realizace. Po zvážení všech kritérií jsem zvolil aktivní filtr s operačním zesilovačem a setrvačností druhého řádu. Výhoda tohoto typu je použití pouze jednoho operačního zesilovače, z čehož vyplývá, že jeho realizace není složitá, ani finančně náročná. Filtry vyšších řádů mají sice lepší schopnost potlačovat složky signálu v nepropustném pásmu, ale jsou také složité na návrh a realizaci. Bývá u nich použit více než jeden operační zesilovač, proto jsou tyto filtry často náročnější také na pořizovací cenu součástek a jejich přesné hodnoty.

Jako zapojení filtru byl zvolen známý a používaný obvod Sallena Keye [8] viz Obr. 3.4. Operační zesilovač je zde v neinvertujícím zapojení, což je velká výhoda, protože se nemusí realizovat zdroj, který by pro něj dodával záporné napájecí napětí.



Obr. 3.4 Obvod Sallen Key

Pro návrh filtru byly tedy voleny následující parametry. Horní mezní frekvence $f_0=50$ Hz a činitel jakosti $Q=0,5$. Vyšší činitele jakosti přinášejí nevyhovující rezonační zesílení signálu v oblasti horního mezního kmitočtu. Výpočet hodnot jednotlivých součástek byl proveden podle postupu uvedeného v [8].

Při návrhu se nejprve musí stanovit koeficient b_{min} . Podle vztahu (3.1).

$$b_{min} = 4 \cdot Q^2 \quad (3.1)$$

Dále je nutné si vypočíst střední hodnotu kapacity C (3.2), stanovit meze pro maximální a minimální velikost kapacit C_1 (3.3) a C_2 (3.4) a koeficient b_{skut} (3.5).

$$C = 10^{-7} \cdot \sqrt{f_0} \quad (3.2)$$

$$C_{1max} = \frac{C}{b_{min}} \quad (3.3)$$

$$C_{2min} = C \cdot b_{min} \quad (3.4)$$

$$b_{skut} = \frac{C_2}{C_1} \quad (3.5)$$

Hodnoty kapacit C_1 a C_2 se volí s ohledem na vypočtené hodnoty C_{1max} a C_{2min} tak, aby odpovídaly skutečně vyráběným hodnotám součástek z normovaných řad. V dalším kroku je potřeba stanovit koeficient α , ten je ovšem pro toto zapojení a poměr kapacit b_{skut} roven jedné. Za pomoci koeficientu α se stanoví odpory R_1 (3.7) a R_2 (3.8).

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}} \quad (3.6)$$

$$R_1 = \frac{R}{\sqrt{\alpha}} \quad (3.7)$$

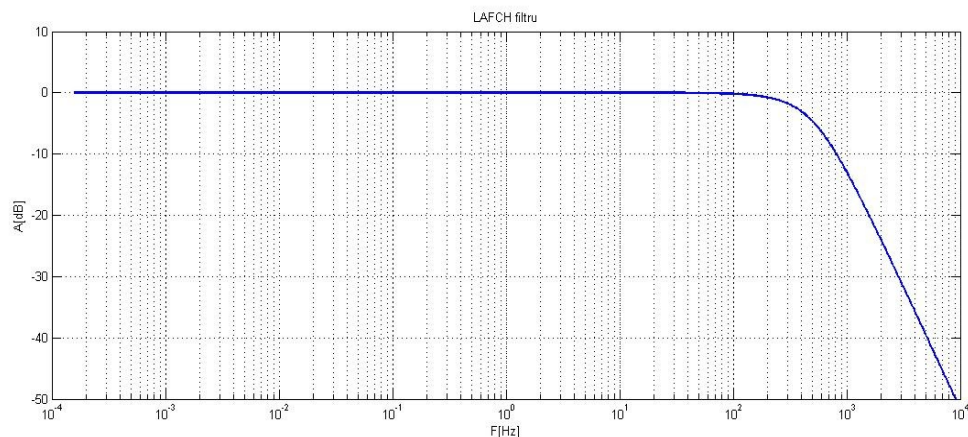
$$R_2 = R \cdot \sqrt{\alpha} \quad (3.8)$$

Skutečné hodnoty odporů R_1 a R_2 se zvolí podle hodnoty z normované řady vyráběných součástek tak, aby co nejlépe odpovídaly vypočteným hodnotám. Skutečný horní mezní kmitočet filtru je zjistitelný ze vztahu (3.9).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2}} \quad (3.9)$$

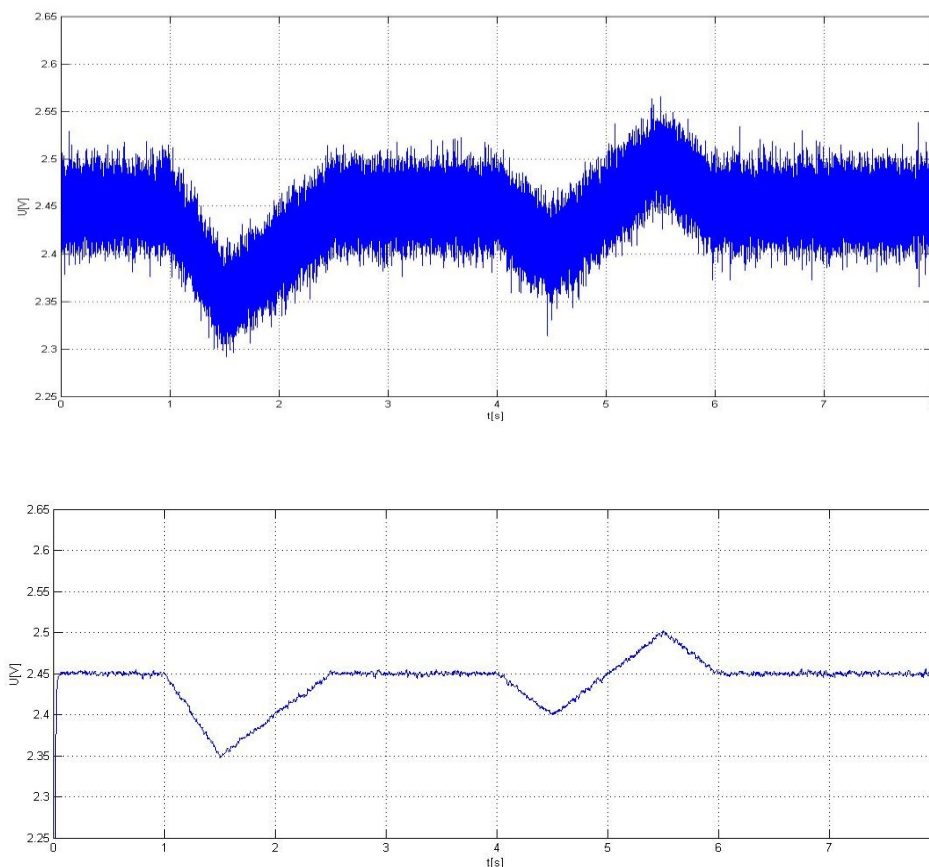
Přenosovou funkci zapojení v oblasti komplexní proměnné lze vyjádřit vztahem (3.10). Lze ji také pro lepší znázornění přenosu obvodu vykreslit jako LAFCH viz Obr. 3.5.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2}}{s^2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2} s + \frac{1}{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2}} \quad (3.10)$$



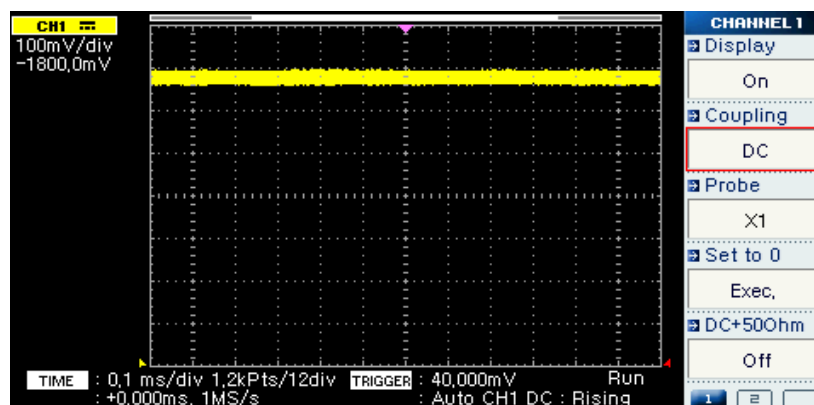
Obr. 3.5 Logaritmicko-amplitudová frekvenční charakteristika filtru

Vypočtené hodnoty součástek byly následně ověřeny a mírně upraveny podle návrhářského programu „Filter-Pro“ vydaný firmou Texas Instruments. K úpravě hodnot jsem dospěl na základě simulačního experimentu v programu „Matlab & Simulink“. Upravený filtr vykazoval menší setrvačné časové konstanty, tudíž se méně projevovalo zkreslení filtrovaného signálu. Výsledné hodnoty součástek jsem navrhl $R_1=1,8 \text{ k}\Omega$, $R_2=3,6 \text{ k}\Omega$, $C_2=1,47 \text{ }\mu\text{F}$ a $C_1=1 \text{ }\mu\text{F}$. Výsledek simulačního experimentu je znázorněn na Obr. 3.6.

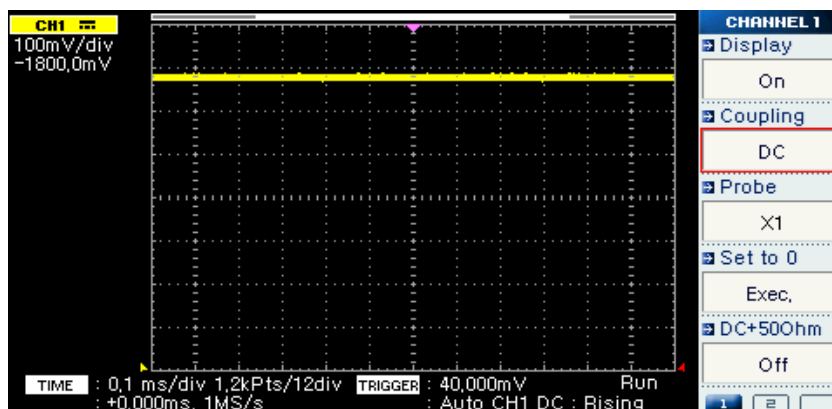


Obr. 3.6 Signál před (horní) a po průchodu (spodní) filtrem

V průběhu řešení práce jsem byl nucen použít měřicí kartu „Hudaq MF 624“ [9] z důvodu urychlení běhu programu. Bez použití měřicí karty trval jeden cyklus programu 200 ms a po jejím začlenění do řídicího obvodu pouze 65 ms. Měřicí kartu je možné také použít jako napájecí zdroj pro senzorickou část plošiny. Této možnosti bylo využito a zapojení senzorické části plošiny bylo upraveno. Oddělením napájecího obvodu senzorické části od napájení motorů byl odstraněn vliv rušení motorů. Navržený filtr již tím pádem nebyl tak potřebný. Přesto jsem v zapojení filtr ponechal, protože měřením byl zjištěn jeho pozitivní vliv na výstupní signál akcelerometru, jak je patrné z Obr. 3.7 a Obr. 3.8.



Obr. 3.7 Signál akcelerometru před vstupem do obvodu filtru



Obr. 3.8 Signál akcelerometru po průchodu obvodem filtru

Pro pozdější testy plošiny je potřebné realizovat měření náklonu základny. Zde se objevila možnost využití akcelerometru ACC7260. Rušivé složky jeho signálu se podařilo eliminovat oddělením napájecího obvodu motorů a senzorické části plošiny. Za těchto okolností nic nebrání jeho použití. Případný vznik chyby měření nebude zde mít žádný fatální následek na průběh stabilizace. V nejhorším případě znehodnotí výsledek testu.

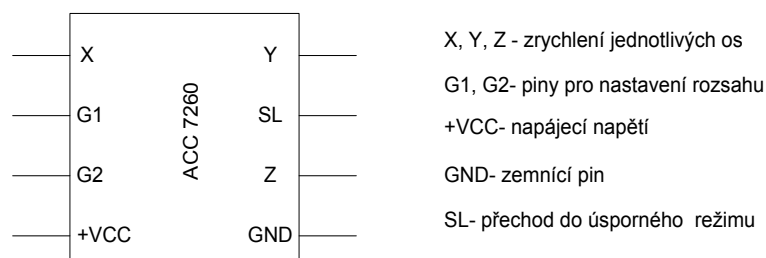
3.3 Popis použitých akcelerometrů

3.3.1 Modul ACC 7260

Jedná se o tříosý MEMS akcelerometr s nastavitelným měřicím rozsahem viz [7] a [10].

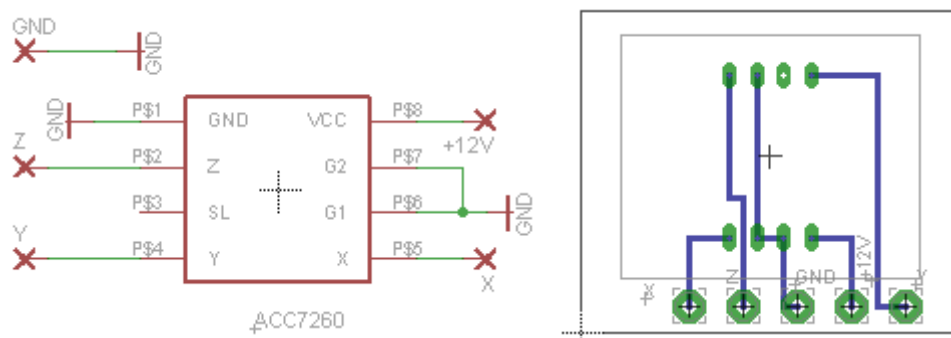
Parametr	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah:	$\pm 1,5$; ± 2 ; ± 4 ; ± 6	g
Citlivost:	800; 600; 400; 200	mV/g
Napájecí napětí:	3.6-16	VDC
Proudová spotřeba:	600	μA

Tab. 3.1 Technické parametry ACC7260



Obr. 3.9 Pouzdro ACC 7260

Z důvodu nastavení měřicího rozsahu a připevnění akcelerometru na plošinu vznikla potřeba vytvořit plošný spoj viz *Obr. 3.10*.



Obr. 3.10 Schéma zapojení (vlevo) a deska pro osazení modulu akcelerometru (vpravo)

3.3.2 ICSensor 3100

Jedná se o jednoosý akcelerometr s pevným měřicím rozsahem viz [6 s. 28 - 29].

Parametr	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah:	± 2	g
Citlivost:	1200	mV/g
Napájecí napětí:	8-30	VDC
Proudová spotřeba:	5	mA

Tab. 3.2 Technické parametry akcelerometru ICSensor3100

Součástí snímače je integrovaný kabel zakončený konektorem pro připojení k měřicí aparatuře. Bylo tedy nutné tento konektor implementovat i do zapojení senzorické části plošiny. Nejvýhodnější varianta byla konektor umístit na plošný spoj osazený frekvenčním filtrem, jehož schéma je uvedeno na *Obr. 3.15*.

Pin:	1	2	3	4	5
Funkce:	GND	V-REF	+VCC	OUT	SHIELD

Tab. 3.3 Popis konektoru akcelerometru ICSensor 3100

3.4 Dovybavení plošiny gyroskopickým senzorem

Gyroskopický senzor je u stabilizační plošiny použit pro korekci chyb měření náklonu stabilizované plochy. Obecně se gyroskop také používá pro orientaci v prostoru a vyznačuje se schopností měřit úhlovou rychlost otáčivého pohybu, z níž se dá jednoduše vypočíst uhlová dráha. Vyrábí se v jednoosém, ale také ve dnes již častěji používaném, dvou a tříosém provedení. Využití nachází například v lodním průmyslu, kdy měří náklon plavidla vznikající vlnobitím a podává informace řídicímu systému, který vliv vlnobití eliminuje.

V případě měření náklonu plošiny pouze akcelerometry se projevovaly značné chyby v přesnosti měření. Byly způsobeny jednak nestálým výstupním signálem akcelerometrů, ale také samotnou funkcí akcelerometru, který je pouze snímačem zrychlení. Stabilizace náklonu plochy je totiž dynamický proces, který neustále koná nějaký pohyb a vytváří tak různá zrychlení. Tato zrychlení akcelerometry samozřejmě zaznamenávají a vnáší tak chybu do měření statického gravitačního zrychlení země. Dalšími problémy akcelerometrů jsou zaznamenávání různých vibrací podložky a měření pohybu plošiny v přímočarém směru. Pro eliminaci těchto rušivých vlivů jsem tedy použil gyroskop.

Gyroskop je podstatně méně náchylný na vibrace podložky a při posunech s plošinou v přímočarém směru udává nulovou hodnotu. Pomocí něj jsem zajistil reakci plošiny pouze na otáčivý pohyb. Gyroskop podává informaci o úhlové rychlosti při rotacích plošiny, což umožnilo odstranit rušivou složku dynamického zrychlení pohybů působící na akcelerometry.

Pro aplikaci byl vybrán dostupný gyroskopický modul Pololu 1266 viz *Obr. 3.11* [11]. Jedná se o dvouosé provedení gyroskopu schopného měřit úhlovou rychlost okolo os rotace X a Y. Výhodou tohoto modulu je výstupní signál přímo úměrný úhlové rychlosti ve $^{\circ}/s$.



Obr. 3.11 Modul dvouosého gyroskopického senzoru Pololu 1266

Parametr	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah:	± 100 nebo ± 400	$^{\circ}/s$
Citlivost:	10 nebo 2,5	$mV/(^{\circ}/s)$
Napájecí napětí:	2,6-16	V
Proudová spotřeba:	6,8	mA

Tab. 3.4 Technické parametry gyroskopického senzoru Pololu 1266

Před použitím gyroskopu bylo důležité zajistit jeho aktivní režim, a to propojením pinu PD (Power down) a GND Obr. 3.12. Výchozí nastavení je totiž univerzálně připraveno i pro použití v aplikacích kde je vyžadována co nejnižší spotřeba, tudíž i využití úsporného režimu gyroskopického snímače. Rovněž bylo třeba dát pozor na správné připojení napájecího napětí. U modulu je možnost použití pinu pro napájení napětím 3,3 V nebo pro vyšší napájecí napětí, které je pak vnitřně regulováno na již zmíněných 3,3 V.



VIN- vstup napájecího napětí 2,7-16 V
 GND- zemnicí pin
 3.3V-vstup napájecího napětí pouze pro 2,7-3,6 V
 Y, X- výstup pro měřicí rozsah $\pm 400^{\circ}/s$
 4X,4Y- výstup pro měřicí rozsah $\pm 100^{\circ}/s$
 PD-Power down
 ST-Self test

Obr. 3.12 Popis připojovacích zdírek gyroskopického snímače Pololu 1266

3.5 Použití měřicí karty

Měřicí karta byla použita hned z několika důvodů. Hlavním důvodem bylo urychlení běhu programu. Původně se hodnoty napětí snímačů měřily pomocí analogových vstupů jednotek EPOS a řídicímu algoritmu byly předávány po sériové komunikační sběrnici RS 232. Ovšem komunikační rychlost RS 232, která dosahuje maximálně 115 kbit/s, se ukázala jako naprosto nedostatečná. Prodlevy v běhu programu způsobené přenosem naměřených dat po sběrnici RS232, mezi řídicím počítačem a jednotkami EPOS, měly za následek zpomalení řídicího algoritmu až o 120 ms. Při použití měřicí karty se doba měření snížila na zanedbatelnou hodnotu cca 0,4 ms. Tato úprava tedy přinesla obrovské urychlení doby cyklu programu, protože odstranila přenos naměřených dat po sběrnici RS 232. Bohužel ale RS 232 není použita jen pro přenos naměřených hodnot snímačů, ale také pro zadávání řídicích povelů jednotkám EPOS. Komunikaci nutnou k ovládání jednotek EPOS jsem bohužel již odstranit nedokázal. V konečném důsledku použitím měřicí karty bylo dosaženo urychlení doby cyklu programu z původních 200 ms na 65 ms.

Další výhodou, která se vyskytla při použití měřicí karty. Je možnost oddělení napájecího odvodu senzorické části od napájecího obvodu motorů. Což má za následek eliminaci rušivých šumových složek napětí, které se indukovaly na signál snímačů a způsobovaly chyby jeho v digitalizaci.

Použitý typ měřicí karty „Hudaq MF 624“ [9] je vybaven 14bit. A/D převodníkem s bipolárním měřicím rozsahem ± 10 V a možností využití až 8 analogových vstupů. Karta ale obsahuje pouze jeden A/D převodník. Měření více vstupů současně zajišťuje vstupní multiplexor, který mezi nimi přepíná. Vzniklá časová diference mezi měřením prvního a posledního analogového vstupu činí maximálně 3,7 μ s, což je pro stabilizační plošinu zanedbatelná doba. Pro připojení vstupních signálů ke kartě slouží 37pinový D-sub konektor viz *Obr. 3.13* (female), který bylo rovněž nutno implementovat do zapojení senzorické části plošiny.

AD0	1	20	DA0	AD0-AD7 Analogové vstupy AGND Analogová zem DA0-DA7 Analogové výstupy DIN0-DIN7 Digitální vstupy(TTL) DOUT1-DOUT7 Digitální výstupy (TTL) -12V Zdroj záporného napětí max.150mA +12V Zdroj kladného napětí max. 150mA +5V Zdroj kladného napětí max. 500mA GND Zem pro DI,DO a napajení
AD1	2	21	DA1	
AD2	3	22	DA2	
AD3	4	23	DA3	
AD4	5	24	DA4	
AD5	6	25	DA5	
AD6	7	26	-12V	
AD7	8	27	+12V	
AGND	9	28	+5V	
DA6	10	29	GND	
DA7	11	30	DOUT0	
DIN0	12	31	DOUT1	
DIN1	13	32	DOUT2	
DIN2	14	33	DOUT3	
DIN3	15	34	DOUT4	
DIN4	16	35	DOUT5	
DIN5	17	36	DOUT6	
DIN6	18	37	DOUT7	
DIN7	19			

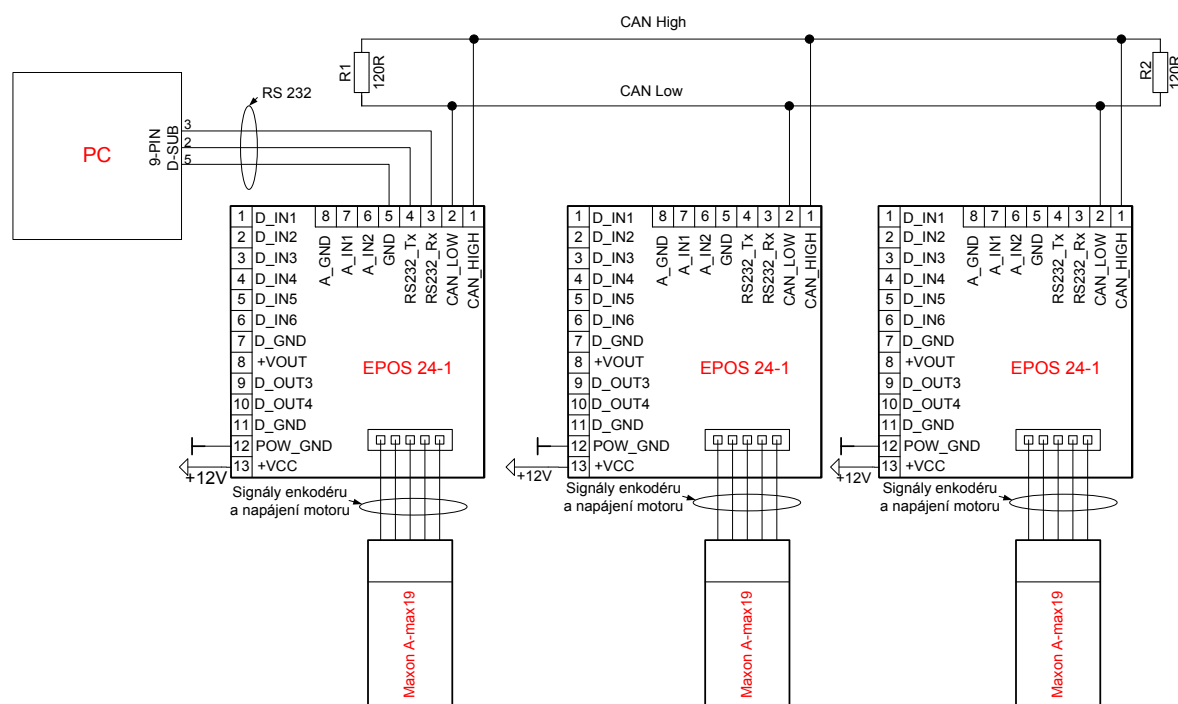
Obr. 3.13 Popis zapojení konektoru měřicí karty

3.6 Schéma zapojení senzorické části

V níže uvedených schématech zapojení senzorické části *Obr. 3.15* a řídicí částí plošiny *Obr. 3.14* je hned několik rozdílů oproti původnímu schématu zapojení z *Obr. 1.4*. Hlavním rozdílem mezi původním zapojením z *Obr. 1.4* a novým upraveným zapojením je oddělení napájecího okruhu senzorické části od napájecího obvodu jednotek EPOS, tedy oddělení řídicí části plošiny od měřicí části. Důvodem tohoto oddělení napájecích okruhů je potlačení rušení, které vzniká převážně v indukčnostech motorů. Další úpravou je zařazení frekvenčního filtru typu dolní propust na výstup akcelerometrů snímajících náklon stabilizované plochy. Jeho úkolem je filtrovat rušivé složky výstupních signálů z akcelerometrů a zpřesnit tak měření náklonu. V předchozím řešení byla filtrace prováděna pouze softwarově a to průměrováním naměřených hodnot. V předchozím řešení bylo také potřeba vnést jistou necitlivost do měření náklonu plošiny, která způsobovala horší reakce plošiny v oblasti malých změn náklonů. Je také potřeba podotknout, že původní zapojení z *Obr. 1.4* mělo společný napájecí okruh snímačů a motorů, což vnášelo velké chyby do měření náklonu.

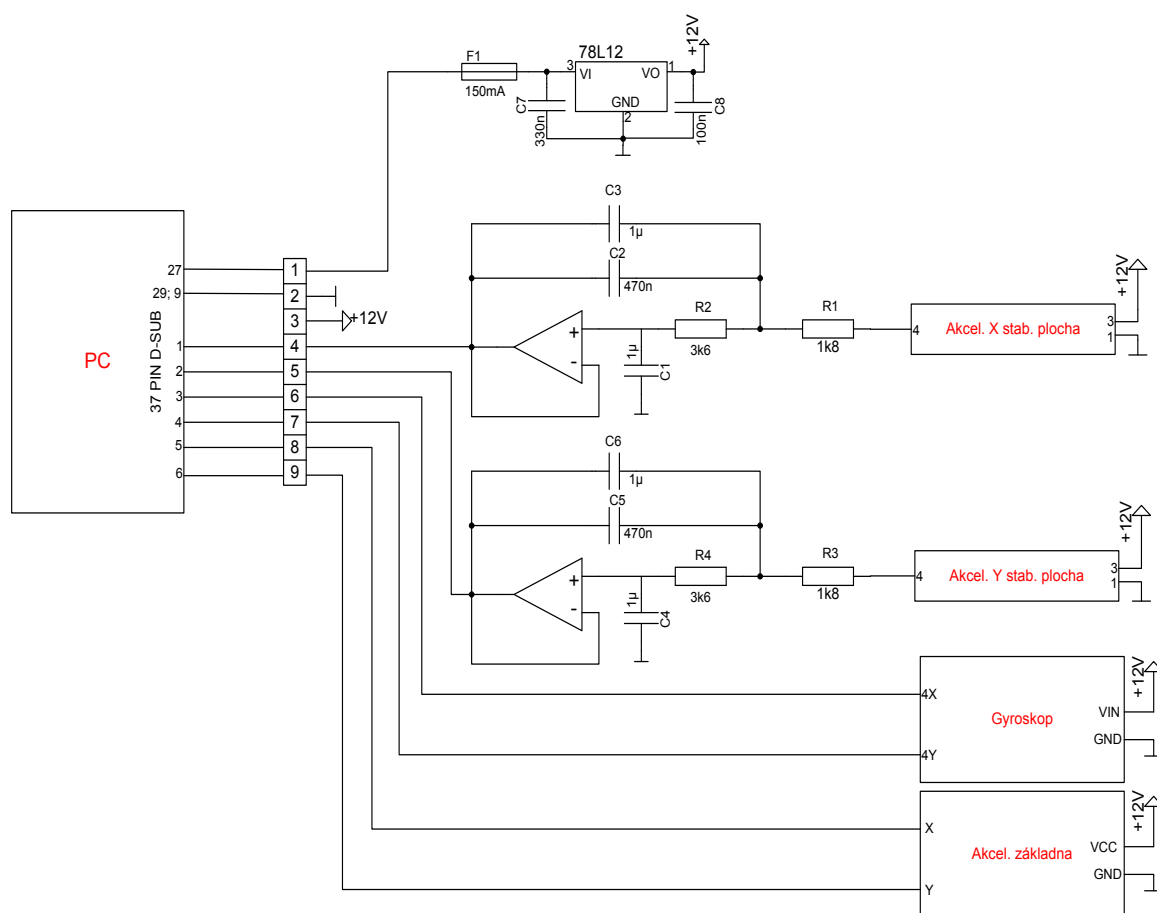
Na *Obr. 3.14* je znázorněno zapojení komunikace mezi řídicím počítačem a jednotkami EPOS 24-1, které zajišťují obsluhu elektropohonu. Zapojení má převážně

digitální komunikační strukturu. Jeho hlavní část se skládá ze sběrnice RS232 sloužící jako komunikační prostředek mezi první jednotkou EPOS a řídícím počítačem. Tato jednotka EPOS zároveň tvoří vstupní bránu na sběrnici CAN, která slouží pro komunikaci mezi jednotkami EPOS. Pro správnou funkci sběrnice CAN je potřeba ji zakončit dvěma odpory o velikosti $120\ \Omega$ takzvanými terminátory.



Obr. 3.14 Schéma propojení jednotek EPOS a řídicího počítače

Na Obr. 3.15 je vyobrazeno zapojení senzorické části plošiny. Tvoří jej tříosý akcelerometr pro snímání náklonu základny, dva jednoosé akcelerometry pro měření náklonu stabilizované plochy a dvouosý gyroskopický snímač pro získání údaje o úhlové rychlosti rotace stabilizované plochy. Na výstupu akcelerometrů stabilizované plochy jsou umístěny frekvenční filtry typu dolní propust. Jejich úkolem je co největší potlačení rušení výstupního signálu. Dále se vyskytuje ve schématu zapojení stabilizátor napětí 78L12 a tavná proudová pojistka. Pojistka slouží jako ochrana měřicí karty pro případ zkratu nebo většího proudového odběru zapojení. Měřicí karta při napájecím napětí 12 V je schopná dodat bezpečně proud max. 150 mA. Stabilizátor napětí není v případě použití napájení z měřicí karty potřebný, ale jeho funkce nijak zařízení neovlivňuje. Naopak umožňuje uživateli využít i jiného napájecího zdroje, např. baterie. Výstupní stabilizované napětí je také vyvedeno na svorkovnici, pro potřebu napájení dalších komponent.



Obr. 3.15 Schéma zapojení senzorické části plošiny

1	+VCC IN
2	GND
3	+12V OUT
4	ACC X stab. Plocha
5	ACC Y stab. Plocha
6	Gyroskop osa X
7	Gyroskop osa Y
8	ACC X základna
9	ACC Y základna

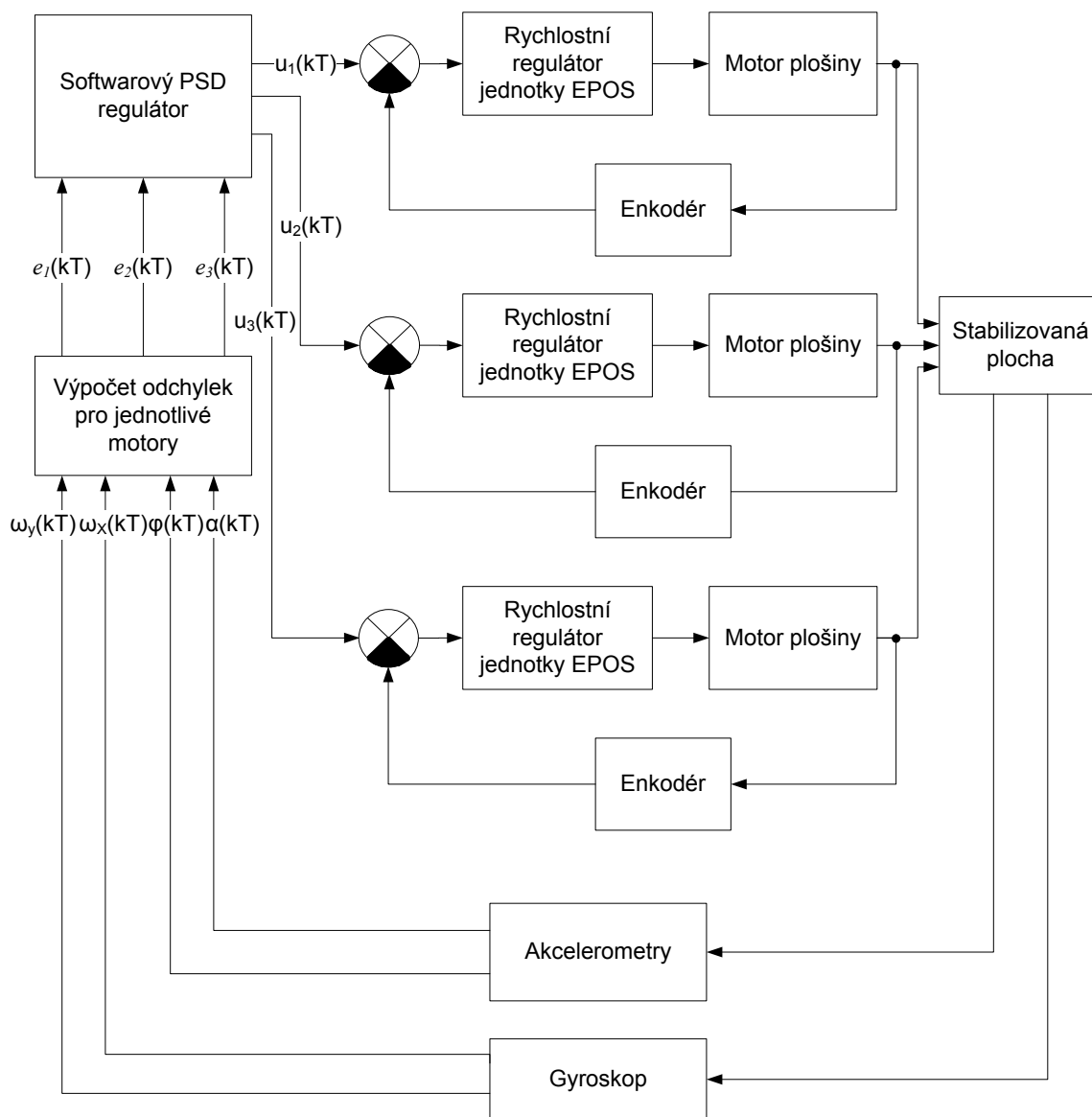
Tab. 3.5 Popis svorkovnice plošného spoje

4 Řízení plošiny

Řízení stabilizační plošiny je realizováno ve dvou režimech, automatickém a manuálním. Automatický režim řízení plošiny je schopen zajistit vodorovnou polohu stabilizované plochy při náklonech plošiny. Manuální režim řízení umožňuje nastavit libovolnou polohu stabilizované plochy, lze jej využít například pro doladění sklonu kamery.

4.1 Automatický režim řízení plošiny

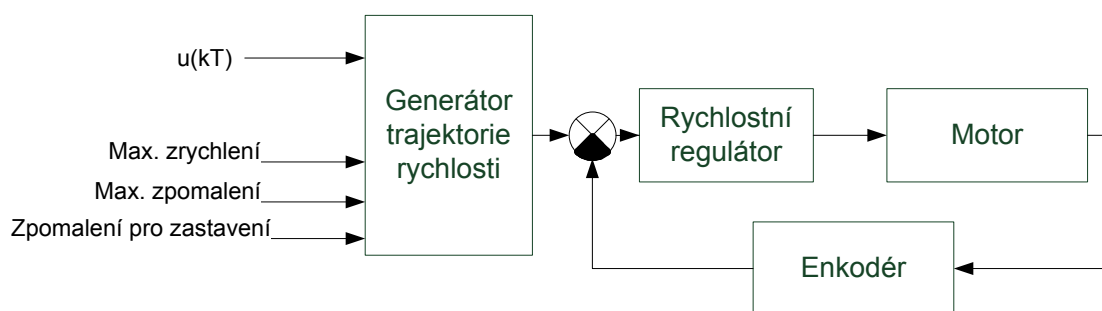
Úkolem automatického režimu řízení plošiny je stabilizovat náklon kamery do vodorovné polohy při náklonu plošiny. Řídicí program v kombinaci s jednotkami EPOS a snímači zde tvoří regulační obvod. Jeho blokové schéma je uvedeno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schéma regulačního obvodu plošiny

Celkový regulační obvod z *Obr. 4.1* se skládá z jedné hlavní regulační smyčky a třech smyček vedlejších. Hlavní regulační smyčku tvoří snímače náklonu (akcelerometry), snímač úhlové rychlosti (gyroskop), řídicí algoritmus a jednotky EPOS s připojenými motory. Výstupem snímačů (akcelerometrů a gyroskopu) je analogové napětí, z kterého se po A/D převodu a výpočtu stanoví úhel náklonu stabilizované plochy pro rotaci okolo osy X $\alpha(kT)$ a úhlová rychlost $\omega_x(kT)$, pro osu Y pak úhel náklonu $\varphi(kT)$ a úhlová rychlost $\omega_y(kT)$. Z naměřených hodnot náklonů a úhlových rychlostí provede řídicí algoritmus výpočet velikosti odchylek od rovnovážné polohy, které vznikly naklopením plošiny na jednotlivých pohybových šroubech motorů $e_1(kT)$, $e_2(kT)$, $e_3(kT)$. Tyto odchylky jsou zadány algoritmu PSD regulátoru, který stanoví velikost akčních veličin pro jednotlivé motory $u_1(kT)$, $u_2(kT)$, $u_3(kT)$. Následně algoritmus předá hodnoty akčních veličin jednotkám EPOS. Každá jednotka představuje jeden vedlejší regulační obvod, který zajišťuje rychlostní řízení k ní připojeného motoru. Vedlejší regulační obvod se skládá z rychlostního regulátoru, motoru a inkrementálního snímače otáček (enkodéru), který slouží jako zpětná vazba pro získání aktuální rychlosti.

Mód jednotek EPOS použitý pro rychlostní řízení motorů ve skutečnosti obsahuje generátor trajektorie rychlosti, tento generátor dostává hodnotu akční veličiny od PC a vytváří z ní žádanou hodnotu pro rychlostní regulátor. Jeho výhodou je možnost nastavení parametrů pohybu motoru, jako jsou maximální otáčky, zrychlení a zpomalení. Principiální schéma požitého módu je znázorněno na *Obr. 4.2*, jeho detailní popis je možno nalézt v [5].



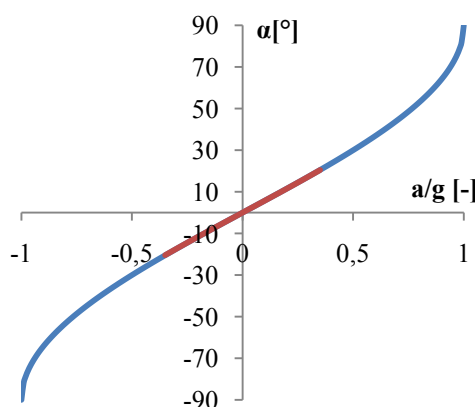
Obr. 4.2 Rychlostní mód s generátorem trajektorie rychlosti

4.1.1 Stanovení velikosti náklonu z napětí akcelerometru

Velikost náklonu je stanovena z napětí akcelerometrů, které měří velikost gravitačního zrychlení země. Závislost úhlu náklonu na měřeném zrychlení má nelineární průběh a je dána vztahem (4.1) kde α je úhel náklonu [°], a je měřené zrychlení akcelerometrem [m/s²] a g konstanta gravitačního zrychlení země [m/s²].

$$\alpha = \arcsin \frac{a}{g} \quad (4.1)$$

Na Obr. 4.3 je vyobrazena funkce arkussinus s červeně vyznačeným pracovním rozsahem náklonu plošiny. Tuto oblast ovšem lze považovat za lineární závislost měřeného zrychlení na úhlu náklonu.



Obr. 4.3 Závislost měřeného zrychlení na úhlu natočení s červeně vyznačeným pracovním rozsahem plošiny

Z tohoto důvodu je možné nelinearitu v dalším výpočtu náklonu zanedbat. Daný akcelerometr jsem pro oblast pracovního náklonu proměřil a z jeho vykreslené charakteristiky stanovil vztah (4.2), který vychází z regresní rovnice změřené charakteristiky.

$$\alpha = \frac{U_m - U_{0g}}{C_{1^\circ}} \quad (4.2)$$

Kde je α úhel náklonu [°], U_m aktuální napětí akcelerometru [V], U_{0g} napětí akcelerometru pro rovnovážnou polohu [V] a C_{1° konstanta změny napětí snímače při jeho pootočení o 1° [V]. U_m , U_{0g} a C_{1° jsou hodnoty určené měřením na existujícím snímači a mohou se tedy pro dva stejné typy snímačů lišit. Výhodou určení náklonu pomocí vztahu stanoveného takto empiricky je eliminace výrobních nepřesností snímačů.

4.1.2 Stanovení úhlové rychlosti z napětí gyroskopu

Pro měření uhlové rychlosti je použit gyroskopický modul Pololu 1266 [11], který má již od výrobce vnitřními obvody upravené výstupní napětí tak, že je přímo úměrné uhlové rychlosti ve $^{\circ}/s$. Vztah pro úhlovou rychlost gyroskopu vychází opět z regresní rovnice charakteristiky snímače.

Při instalaci gyroskopu na plošinu vznikl drobný problém. Nainstalovaný gyroskopický snímač má opačně orientovaný směr pohybu v ose X vůči směru zrychlení akcelerometru. Na výstupu snímačů se to projeví tak, že při pohybu s plošinou v kladném směru napětí akcelerometru stoupá a gyroskopu klesá. Tento jev jsem ale odstranil úpravou vztahu pro výpočet uhlové rychlosti. Pro natočení okolo osy X tedy platí vťah (4.3) a pro osu Y pak vztah (4.4).

$$\omega_x = \frac{U_{0\omega} - U_m}{C_{1^{\circ}/s}} \quad (4.3)$$

$$\omega_y = \frac{U_m - U_{0\omega}}{C_{1^{\circ}/s}} \quad (4.4)$$

Kde ω_x a ω_y jsou úhlové rychlosti rotace okolo jednotlivých os $[^{\circ}/s]$, U_m aktuální naměřené napětí gyroskopu [V], $U_{0\omega}$ je napětí pro nulovou hodnotu úhlové rychlosti [V] a $C_{1^{\circ}/s}$ je konstanta citlivosti změny napětí snímače při změně úhlové rychlosti o 1 $^{\circ}/s$ [V]. Hodnoty $U_{0\omega}$ a $C_{1^{\circ}/s}$ lze vyčíst z katalogu výrobce daného snímače, ale přesto je lepší si $U_{0\omega}$ ověřit měřením a odstranit tím tak případnou nepřesnost výroby.

4.1.3 Výpočet náklonu stabilizované plochy

Náklon stabilizované plochy je určován pomocí akcelerometrů, které měří velikost statického gravitačního zrychlení země. Akcelerometr ovšem neměří jen požadované gravitační zrychlení, ale rovněž různá zrychlení pohybů plošiny, nebo např. vibrace podložky. Plošina pak reaguje i na jiné podněty než má. Pro kompenzaci těchto nežádoucích jevů byl použit gyroskopický snímač, který měří pouze úhlovou rychlost pohybu a je mnohem méně náchylný na měření vibrační podložky.

Prvotní myšlenkou bylo získávat náklon z obou snímačů samostatně a následně jej porovnávat. V případě jejich odlišností upravit výsledný náklon tak, aby se odstranila nežádoucí chyba. Problémem se však ukázala nedostatečná vzorkovací perioda měřené úhlové rychlosti gyroskopu. Vzorkovací periodu nelze snížit pod 65 ms. Takto

velká prodleva ve vzorkování je způsobená dobou cyklu programu a hlavně komunikací s jednotkami EPOS po sériovém rozhraní RS 232. Prodleva v komunikaci tedy zapříčinila nepřesné výsledky výpočtu náklonu z gyroskopu. Náklon je úhlovou dráhou pohybu a tu lze vypočíst integrací uhlové rychlosti. Ovšem pro přesný výpočet uhlové dráhy je potřebné přesné měření uhlové rychlosti a tudíž menší vzorkovací perioda. U akcelerometrů problém s vzorkovací periodou není, protože jejich výstup je přímo úměrný úhlu náklonu.

Nakonec bylo přistoupeno k níže uvedené jednodušší variantě korekce chyby měření akcelerometrů. Pro případ ustáleného stavu stabilizované plochy ve vodorovné pozici jsou reakce plošiny na vibrace podložky a pohyby s ní v přímočarém směru odstraněny korekcí podle vztahu (4.5). Naopak, když v tomto ustáleném stavu dojde k příliš rychlému pohybu s plošinou nad $\pm 25^\circ/\text{s}$, tak se náklon stabilizované plochy určí jako 70 % náklonu změřeného pomocí akcelerometrů (4.6). Těchto 70 % bylo učeno experimentálně při zkoumání chování plošiny. V ostatních případech se náklon stabilizované plochy určuje podle vztahu (4.7).

$$\alpha_k = 0 |_{\omega \leq \mp 3} \quad (4.5)$$

$$\alpha_k = 0,7 \cdot \alpha |_{\omega \geq \mp 25} \quad (4.6)$$

$$\alpha_k = \alpha |_{\omega \geq \mp 3 \text{ \& } \omega \leq \mp 25} \quad (4.7)$$

Kde je α_k korigovaný úhel náklonu $[\circ]$, ω úhlová rychlost $[\circ/\text{s}]$ a α úhel náklonu změřený akcelerometrem $[\circ]$.

Výše uvedený výpočet náklonu platí pouze pro případ, kdy je plošina ustálená ve vodorovné poloze. Za vodorovnou polohu se předpokládá odchylka od rovnovážné polohy menší než $0,5^\circ$ v obou osách rotace. Při přechodu plošiny do stavu provádění stabilizace se náklon stabilizované plochy stanovuje podle vztahů (4.8) a (4.9).

$$\alpha_k = 0,7 \cdot \alpha |_{\omega \geq \mp 25} \quad (4.8)$$

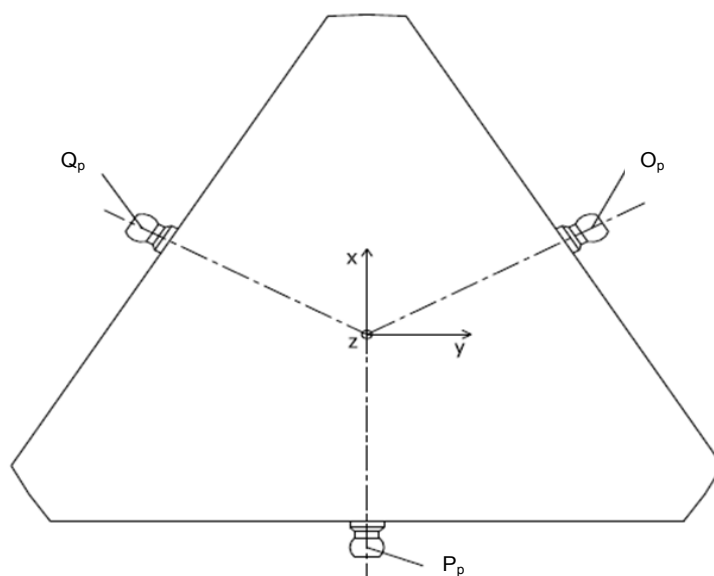
$$\alpha_k = \alpha |_{\omega \leq \mp 25} \quad (4.9)$$

Kde je α_k korigovaný úhel náklonu $[\circ]$, ω úhlová rychlost $[\circ/\text{s}]$ a α úhel náklonu změřený akcelerometrem $[\circ]$.

4.1.4 Výpočet odchylek pro jednotlivé motory

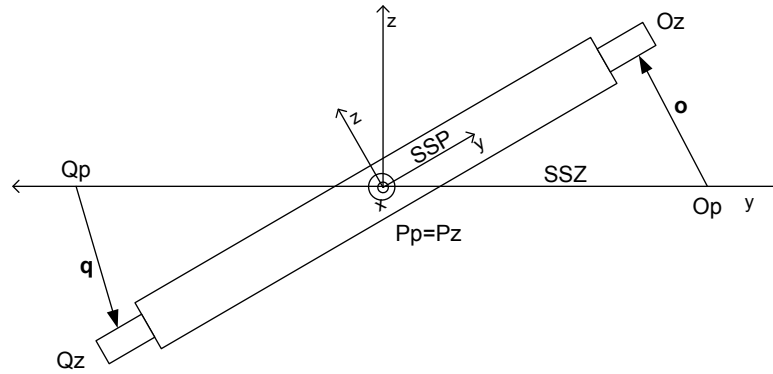
Princip výpočtu odchylek pro jednotlivé motory byl zachován z původního řešení diplomové práce Petra Špačka a lze jej nalézt také v [1].

Pro výpočty odchylek vzniklých na jednotlivých pohybových šroubech je nutné si nejprve zavést dva souřadné systémy. Souřadný systém stabilizované plochy (dále jen SSP) a souřadný systém základny (dále jen SSZ). Počátek SSP se umístí do středu stabilizované plochy. V SSP se zavedou do středu kulových kloubů body O_p , P_p , Q_p viz *Obr. 4.4*. Počátek SSZ se umístí totožně s tím rozdílem, že se jedná o souřadný systém, který je vždy vodorovný s podložkou.



Obr. 4.4 Umístění bodů do Souřadného systému plošiny

Ve vodorovné poloze stabilizované plochy je SSP shodný s SSZ, tudíž jsou nulové i odchylky. Při naklopení plošiny dojde k potočení SSP okolo SSZ a body O_p , P_p , Q_p se do SSZ transformují na body O_z , P_z , Q_z . Mezi původními body v SSP a novými v SSZ vzniknou odchylky, které je nutno minimalizovat. Vzniklé odchylky jsou rovny vektorům \mathbf{o} , \mathbf{p} , \mathbf{q} . Pootočení souřadných systémů je znázorněno na *Obr. 4.5*. Pro jednodušší a přehlednější zobrazení vzniklých odchylek je situace znázorněna pouze pro rotaci okolo osy X.



Obr. 4.5 Pootočení souřadných systémů okolo osy X

Pootočení souřadných systémů charakterizuje transformační matice TM (4.12). Ta vznikne vynásobením matic R_α (4.10) charakterizující rotaci okolo osy X a matice R_φ (4.11) pro rotaci okolo osy Y.

$$R_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$R_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$TM = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ \sin \alpha \cdot \sin \varphi & \cos \alpha & -\sin \alpha \cdot \cos \varphi \\ -\cos \alpha \cdot \sin \varphi & \sin \alpha & \cos \alpha \cdot \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Kde α představuje úhel náklonu okolo osy X [°] a φ úhel náklonu okolo osy Y [°]. Body O_p , P_p , Q_p se následně vynásobí transformační maticí TM a transformují se tak z SSP do SSZ na body O_z , P_z , Q_z (4.13).

$$O_z = TM \cdot O_p \quad P_z = TM \cdot P_p \quad Q_z = TM \cdot Q_p \quad (4.13)$$

Nyní mezi původními body v SSP a novými v SSZ vzniknou vektory \mathbf{o} , \mathbf{p} , \mathbf{q} . Jejichž souřadnice se získají podle vztahu (4.14).

$$\mathbf{o} = O_p - O_z \quad \mathbf{p} = P_p - P_z \quad \mathbf{q} = Q_p - Q_z \quad (4.14)$$

Velikosti těchto vektorů jsou hledané velikosti odchylek od rovnovážné polohy a vypočtou se podle vztahu (4.15).

$$O_v = \sqrt{O_x^2 + O_y^2 + O_z^2} \quad P_v = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad Q_v = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2} \quad (4.15)$$

Ovšem při výpočtu velikosti vektoru se ztrácí znaménko, tudíž i směr vzniklé odchylky. Směr odchylky lze zpětně zjistit podle znaménka souřadnice Z bodů O_z , P_z a Q_z .

4.1.5 Algoritmus PSD regulátoru

Z vypočtených odchylek podle předchozí kapitoly 4.1.4 je nyní potřeba stanovit akční veličiny. Těmi jsou v tomto případě otáčky motoru. Pro jejich výpočet je realizován algoritmus číslicového PSD (proporcionálně sumačně diferenčního) regulátoru. Při návrhu algoritmu jsem vycházel z přenosu spojitého PID regulátoru (4.16). Jeho postupnými úpravami jsem dospěl k výpočtu akční veličiny v diskrétní časové oblasti stanovené podle algoritmu PSD regulátoru. PSD regulátor je analogický k PID regulátoru s tím rozdílem že se využívá pro číslicovou regulaci.

$$G(s) = K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s \quad (4.16)$$

Po převedení přenosu z oblasti komplexní proměnné do diskrétní časové oblasti a dosazení odchylky do přenosu se získá vztah pro akční veličinu v diskrétním čase (4.17).

$$u(kT) = K_P \cdot e(kT) + \frac{K_P}{T_I} \cdot \int e(kT) dT + K_P T_D \cdot \frac{de(kT)}{dT} \quad (4.17)$$

Kde je $u(kT)$ akční veličina, $e(kT)$ vzniklá odchylka, K_P konstanta zesílení, T_I integrační časová konstanta a T_D derivační časová konstanta. Ve výpočtu akční veličiny jsou dvě složitější matematické operace. Pro integraci je použita numerická metoda čtverců, která sčítá jejich obsahy vytvářející se pod křivkou odchylky. Integrace se tedy provádí podle vztahu (4.18). Kde $e(kT)$ představuje aktuální vypočtenou odchylku, T čas po který je vypočtená odchylka platná, čili doba cyklu programu, i představuje proměnnou programu pro ukládání hodnoty integrace aktuálního časového úseku.

$$\int e(kT) dT = i + e(kT) \cdot T \quad (4.18)$$

Derivace odchylky se realizuje podle vztahu (4.19). Kde $e(kT)$ je hodnota aktuální vypočtené odchylky, $e[(k-1)T]$ hodnota odchylky minulé a T představuje dobu cyklu programu.

$$\frac{de(kT)}{dT} = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (4.19)$$

Výslednou akční veličinu pro každý motor algoritmus vypočte ze vztahu (4.20). Po výpočtu všech třech akčních veličin je potřeba zohlednit maximální akční veličinu, tudíž maximální povelové otáčky motoru, které jsou pro použitý typ 8000 ot/min. V případě že vypočtené otáčky překročí maximální mez, algoritmus skutečnou hodnotu položí rovnu maximální hodnotě otáček a zadá ji jednotkám EPOS.

$$u(kT) = K_P \cdot e(kT) + \frac{K_P}{T_I} \cdot (i + e(kT) \cdot T) + K_P T_D \cdot \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (4.20)$$

Nežádoucím faktorem při použití PSD regulátoru je jeho občasná zbytková integrační složka při nulové odchylce. Algoritmus v takovém případě zareaguje a integraci položí rovnu nule. V případě že by se opatření neprovedlo, měla by zbytková integrační složka na regulaci nežádoucí vliv a pokračovala by zbytečně i při nulové odchylce. Jev zbytkové integrační složky je v technické praxi naprosto běžným případem.

Konstanty regulátoru byly prvotně seřizeny podle Zieglerovy – Nicholsovy experimentální metody kritických parametrů. Postup seřízení je uveden v [12]. Ovšem metoda kritických parametrů je známa svým relativně velkým překmitem přechodové charakteristiky regulované soustavy, její použití je vhodné pouze pro prvotní seřízení regulátoru. Překmit v regulaci stabilizované plochy je nežádoucí. Konstanty regulátoru tedy byly následně experimentálně doladěny tak, aby byl průběh regulace optimální. Výsledné konstanty jsem stanovil $K_P=1000$, $T_I=5$, $T_D=0,009$.

4.1.6 Hlídaní okrajových pozic

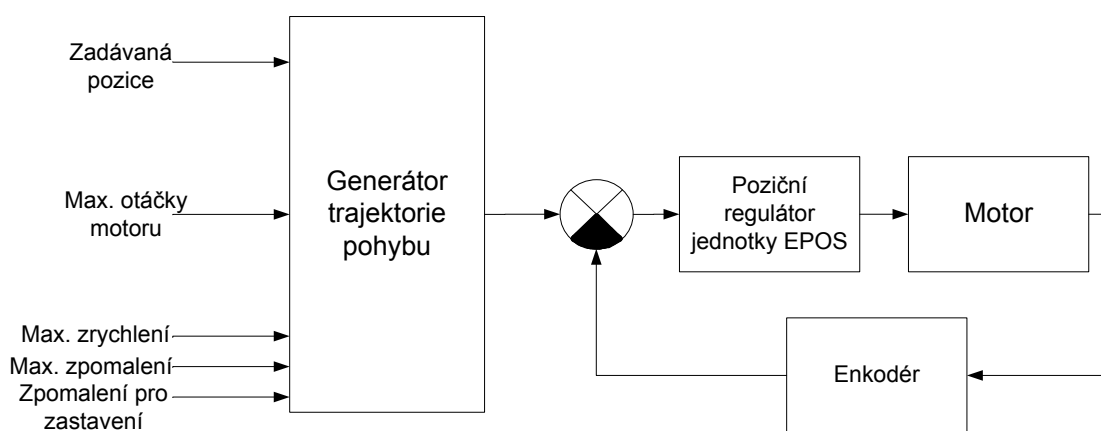
Algoritmus řízení je z důvodu bezpečnosti schopen hlídat okrajové pozice plošiny. Ve většině případů je schopen také vyřešit stav jejich dosažení a pokračovat dále ve stabilizaci. V případě překročení horní mezní pozice by došlo k rozpojení závitu pohybové matice a šroubu. Při překročení dolní mezní pozice by došlo k nárazu matice do motoru. Funkce algoritmu je patrná z Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Vývojový diagram algoritmu hlídání okrajových pozic

4.2 Manuální režim řízení plošiny

Pohyby s plošinou lze provádět také s pomocí manuálního ovládání. V tomto režimu má uživatel možnost nastavit libovolnou polohu pohyblivé plochy. Pohyb zde lze provádět buď s každým motorem samostatně, nebo se všemi motory najednou. K řízení samotných motorů se používá poziční mód jednotek EPOS se zabudovaným generátorem trajektorie pohybu. Ten je schopen zajistit pohyb na zadanou absolutní či relativní pozici. Jelikož mód obsahuje generátor trajektorie pohybu je v něm možné nastavit maximální zrychlení, zpomalení a otáčky motoru. Blokové schéma řízení v tomto módu se nalézá na *Obr. 4.7*. Jeho podrobný popis je uveden v [5].



Obr. 4.7 Blokové schéma pozičního módu s generátorem trajektorie pohybu

Algoritmus programu je v tomto režimu velice jednoduchý. Uživatelské rozhraní obsahuje tlačítka pro posun plochy nahoru a dolů. Při stisku funkčního tlačítka zadá program jednotce velikost pozice představující posun o jeden milimetr. Při podržení stisknutého tlačítka zadává program tuto hodnotu cyklicky, dokud tlačítko uživatel neuvolní.

S pomocí manuálního ovládání lze dostavit polohu kamery, umístěné na plošině, tak jak je potřeba. Další možnost využití se naskytne, když je zapotřebí mít kameru jinak než vodorovně. Při přechodu programu z manuálního režimu do automatického se stabilizovaná plocha opět automaticky ustaví do vodorovné polohy.

4.3 Průběh algoritmu programu

Při spuštění programu se nejprve provádí inicializace zařízení. V první části proběhne zahájení komunikací s měřicí kartou a jednotkami EPOS. Poté se založí jednotlivé třídy potřebné pro obsluhu snímačů. V poslední fázi prvotní inicializace se provede polohová inicializace stabilizované plochy. Pro tento účel jsou jednotky EPOS vybaveny Homing módem, který má několik metod provedení. Použitá metoda Homing módu u plošiny spočívá v pomalém otáčení motoru a přesouvání pohybové matice směrem k hřídeli motoru. Když matice dojde na konec své trasy, vzroste odebíraný proud motoru, který se snaží v pohybu pokračovat. Homing mód hlídá právě tento nárůst proudu a vyhodnotí ho jako dosažení konečné pozice. Zastaví pohyb motoru a vynuluje čítač pulzů enkodéru. Nyní algoritmus čeká, až se do této pozice dostanou všechny tři motory. Pak nastaví poziční mód a provede výjezd stabilizované plochy do výchozí pozice.

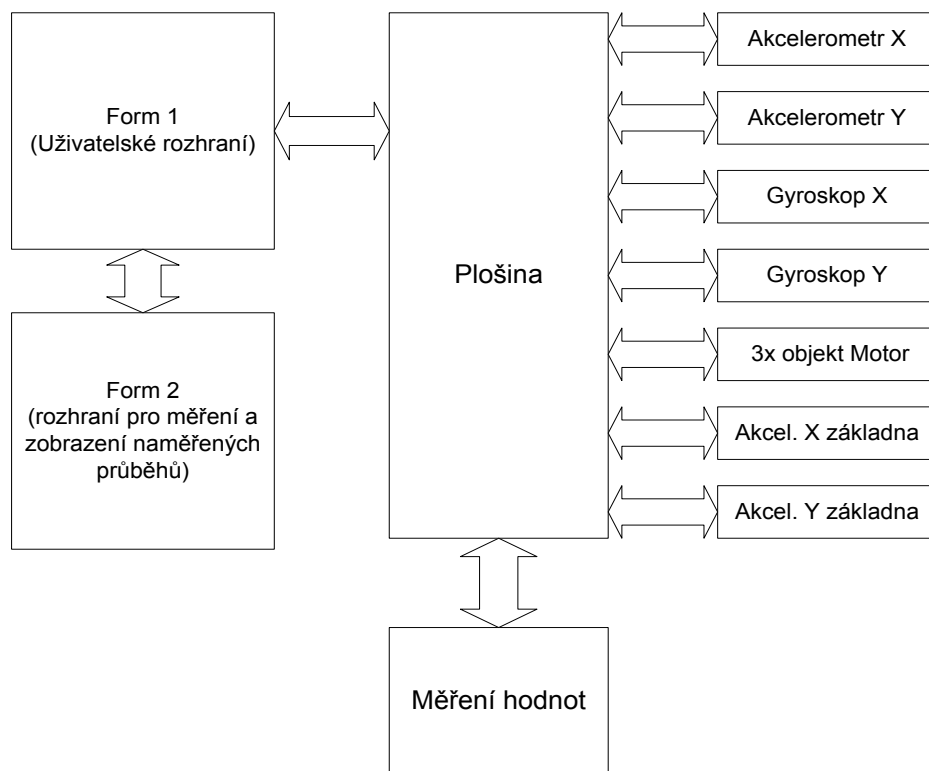
Když je zařízení takto zinicializováno přejde do automatického režimu řízení a spustí se komponenta jazyka Visual Basic „Timer“. Ten udává, v jakém časovém intervalu se provádí cyklus programu. Jeho hodnota je nastavená na 65 ms. Bohužel jsem se nedostal na nižší hodnotu doby cyklu programu z důvodu dlouho trvající komunikace mezi řídicím počítačem a jednotkami EPOS.

Při každém signálu časovače algoritmus změří pět hodnot z akcelerometru osy X. Uspořádá je od nejmenší po největší a vezme prostřední naměřenou hodnotu jako referenční. Nyní k hodnotě referenční přičte naměřené hodnoty lišící se maximálně o ± 5 mV a provede jejich aritmetický průměr. Z takto získané hodnoty pak vypočte náklon okolo osy X. Ten následně zaokrouhlí na půl nebo celý stupeň. Totožně se výpočty provedou pro osu Y a náklon základny v obou osách. V dalším kroku algoritmus změří tři hodnoty napětí z gyroskopu, provede jejich aritmetický průměr a vypočte úhlovou rychlost pro obě osy rotace.

V následujícím kroku se vypočte z naměřených hodnot náklon stabilizované plochy podle kapitoly 4.1.3, který je transformován na vzniklé odchylky od rovnovážné polohy jednotlivých motorů viz kapitola 4.1.4. V další fázi se provede integrace a derivace těchto odchylek podle vztahů (4.18) a (4.19). Nyní jsou všechny vypočtené hodnoty odchylek včetně jejich integrací a derivací předány algoritmu PSD regulátoru, který stanoví velikosti akční veličin pro jednotlivé motory a zadá je jednotkám EPOS. Celý výše popsaný

algoritmus automatického režimu se provádí s každým příchodem události časovače „Timer“.

V případě přepnutí do manuálního režimu řízení se časovač zastaví a algoritmus čeká na další povely uživatele. Na Obr. 4.8 je vykreslen objektový diagram programu. Znázorňuje jeho složení a průběh komunikace mezi jednotlivými třídami.



Obr. 4.8 Objektový diagram programu

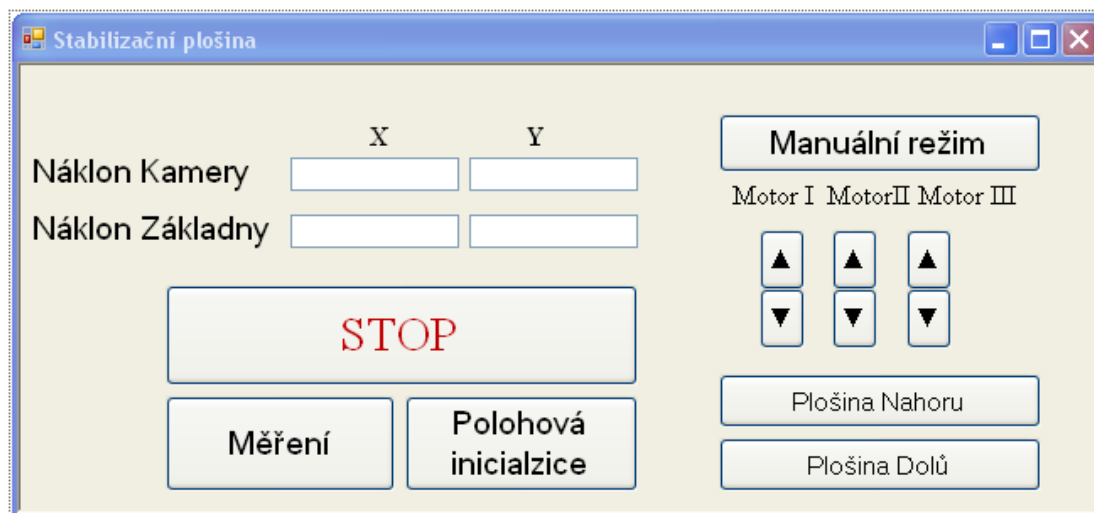
Ve skutečnosti je kód programu napsaný pouze pro jednu třídu Motor, Akcelerometr, Gyroskop a Plošina. Ostatní objekty jsou na nich založeny a využívají jejich kód. Toto je velká výhoda jazyka Visuál Basic. Pro několik komponent s totožným ovládáním stačí kód programu napsat jen jednou. Klíčovou je třída Plošina, která řídí průběh ostatních tříd. Spouští měření jednotlivých snímačů, zajišťuje výpočet odchylek, akčních veličin a provádí počáteční a polohovou inicializaci zařízení. Třída Akcelerometr slouží pro měření hodnot napětí, jejich filtrování a zajišťuje přepočet napětí akcelerometru na úhel náklonu. Stejný průběh má i třída Gyroskop. Třída Motor zprostředkovává komunikaci mezi řídicím algoritmem a jednotkami EPOS.

Jedním z úkolů mé bakalářské práce je také monitorovat chování stabilizační plošiny. Za tímto účelem bylo vyvinuto rozhraní pro měření a zobrazení grafických průběhů zkoumaných veličin. Toto rozhraní znázorňuje objekt Form 2, společně s ním spolupracuje třída Měření hodnot, která zajišťuje sběr potřebných dat.

4.4 Popis uživatelského rozhraní

4.4.1 Řídicí rozhraní

Pomocí řídicího rozhraní vyobrazeného na *Obr. 4.9* uživatel může s plošinou komunikovat a zasahovat do řídicího algoritmu. Popis funkce jednotlivých tlačítek je uveden v *Tab. 4.1*.



Obr. 4.9 Řídicí uživatelské rozhraní plošiny

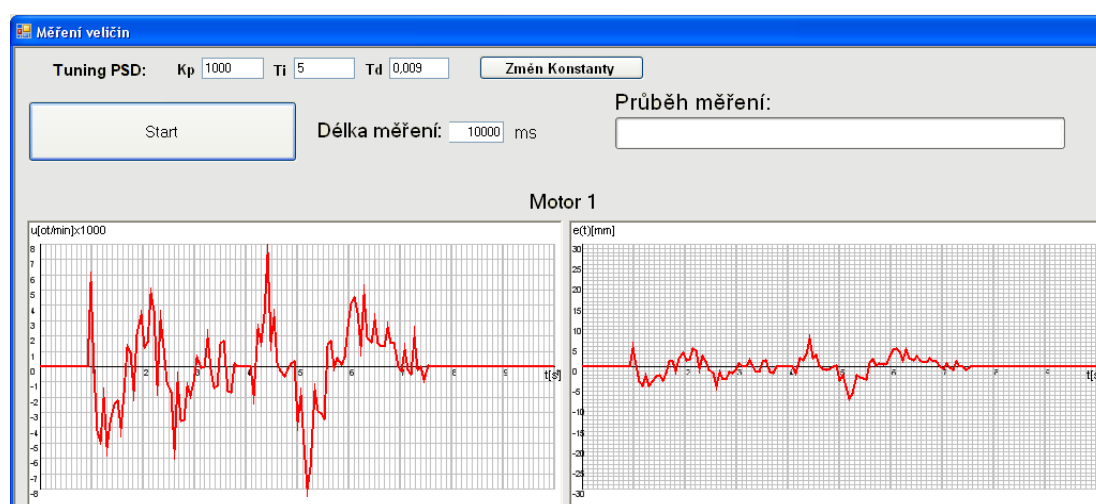
Název tlačítka	Funkce
Stop/Start	Zastavení či spuštění chodu programu.
Polohová inicializace	Zastaví algoritmus, provede polohovou inicializaci a opět jej zase spustí.
Měření	Zobrazí rozhraní pro měření veličin
Manuální režim/ Automatický režim	Přechod mezi režimy
Plošina Nahoru	Vyjede s plošinou o 1mm nahoru v případě podržení tlačítka se posunutí cyklicky opakuje.
Plošina Dolů	Sjede s plošinou o 1mm nahoru v případě podržení tlačítka se posunutí cyklicky opakuje.
▲	Pootočí s vybraným motorem a posune pohybovou maticí o 1mm nahoru. V případě podržení se posun cyklicky opakuje.
▼	Pootočí s vybraným motorem a posune pohybovou maticí o 1mm dolů. V případě podržení se posun cyklicky opakuje.

Tab. 4.1 Funkce tlačítek řídicího rozhraní

4.4.2 Měřicí rozhraní

Měřicí rozhraní viz *Obr. 4.10* bylo vinuto pro pozorování a zkoumání chování plošiny. Jeho koncepce a obsluha je velice jednoduchá. Stačí pouze zadat délku měření v milisekundách a spustit jej. Po dobu měření je zapotřebí provádět s plošinou požadované pohyby. Komponenta ukazující průběh měření bohužel není příliš přesná, musí se brát spíše orientačně. Po ukončení měření jsou vykresleny grafické průběhy jednotlivých veličin v čase. Vykreslování už během doby měření způsobovalo zpomalení cyklu programu a mělo tak negativní účinky na chod zařízení. Měřené hodnoty se průběžně zaznamenávají do textových souborů, ze kterých se po ukončení měření zpětně vyčtou. Tento způsob zaznamenávání má výhodu v možnosti pozdějšího zpracování naměřených dat, které zůstanou v textových souborech uloženy po ukončení programu.

Měřicí rozhraní poskytuje možnost sledovat odchylky a akční veličiny všech motorů, náklon stabilizované plochy a náklon základny v obou osách. Rovněž v něm lze provádět ladění konstant PSD regulátoru a prakticky tak ihned sledovat výsledky.



Obr. 4.10 Měřicí rozhraní

Název komponenty/tlačítka	Funkce
Start	Spouští měření po ukončení se automaticky vykreslí průběhy
Délka měření	Zde je potřeba zadat jak dlouho má měření trvat
Průběh měření	Zobrazuje procenta dokončení
Kp	Pole pro zadání konstanty zesílení PSD regulátoru
Ti	Pole pro zadání integrační časové konstanty PSD regulátoru
Td	Pole pro zadání derivační časové konstanty PSD regulátoru
Změn Konstanty	Tlačítko pro potvrzení a změnu konstant PSD regulátoru

Tab. 4.2 Funkce tlačítek a komponent měřicího rozhraní

5 Testy chování stabilizační plošiny

5.1 Přehled dosaženého chování a technických parametrů plošiny

Hodnoty uvedené v Tab. 5.1 byly zjištěny měřením na hotovém funkčním zařízení. V případě charakteristiky motoru jsou údaje získány z jeho katalogového listu a následně přepočteny pomocí převodového poměru na parametry pohybového šroubu.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Maximální rychlost stabilizace ¹	17	°/s
Přesnost stabilizace	±0,5	°
Čas regulace náklonu o velikosti 5° ²	0,325	s
Čas regulace náklonu o velikosti 10° ²	0,9	s
Čas regulace náklonu o velikosti 15° ²	1,2	s
Max. povolený náklon	±20	°
Nosnost plošiny	0,5	kg
Rozlišitelnost posuvu v manuálním režimu	1	mm
Charakteristika motoru/pohybového šroubu		
Max. otáčky motoru/šroubu	8000/275	ot/min
Převodový poměr	1:29	-
Max rychlost posuvu pohybové matice	40	mm/s
Napájecí napětí	9-24	VDC
Max. Proudový odběr ³	2	A

Tab. 5.1 Přehled dosaženého chování a technických parametrů plošiny

¹ Vyjadřuje maximální změnu náklonu v průběhu jedné sekundy, kterou je plošina schopná minimalizovat.

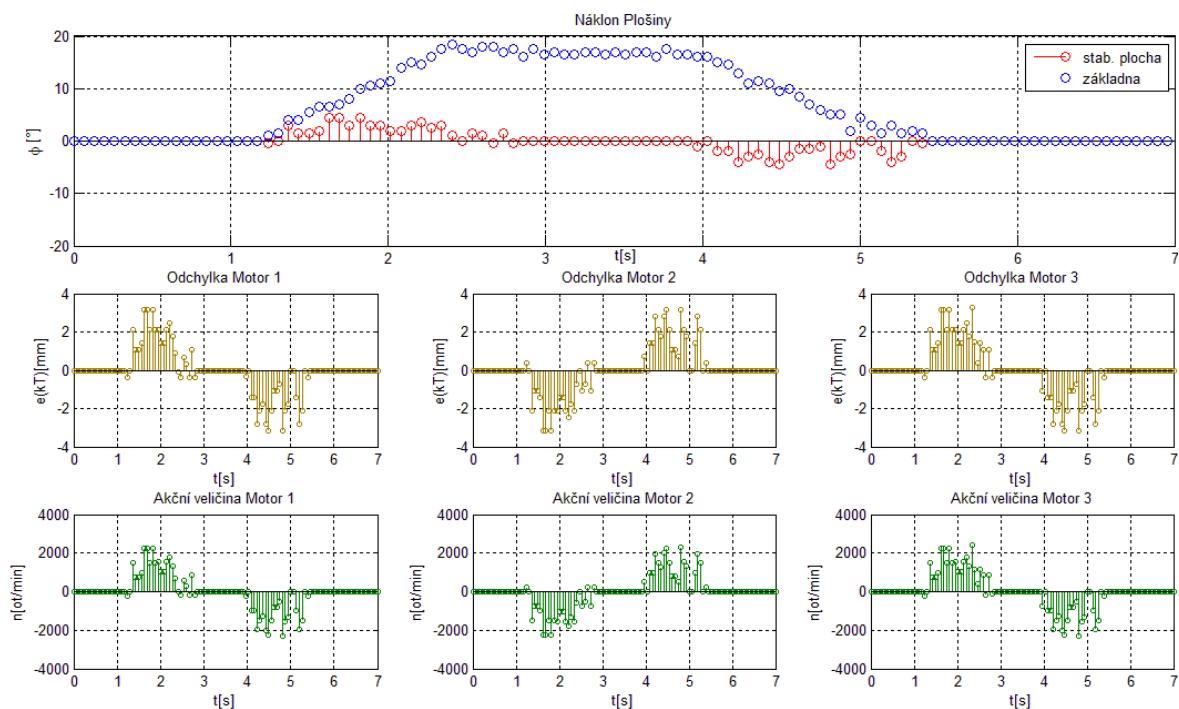
² Rychlost stabilizace běžného provozního náklonu. Změna náklonu plošiny není tudíž skoková, ale průběžná.

³ Jedná se o proudový odběr pouze jednoho motoru. Pro správnou funkci plošiny je tedy potřeba zajistit zdroj schopný dodat až 6 A.

5.2 Průběh stabilizace náklonu

Jedním z hlavních požadavků na plošinu je co nejrychlejší regulace náklonu na nulovou hodnotu. Následující test měl za úkol prověřit průběh náklonu základny a stabilizované plochy. Pro lepší vyhodnocení chování je test proveden samostatně pro náklony okolo osy X a Y. Chování plošiny bylo sledováno pro pomalou průběžnou změnu a rychlou skokovou změnu náklonu základny. Měření náklonu se provádělo pomocí akcelerometrů umístěných na základně a na stabilizované ploše. K záznamu jejich hodnot je použito měřicí rozhraní plošiny.

Jako první je uveden graf reakce plošiny na pomalou změnu náklonu okolo osy Y. Graf je vykreslen jako diskretní časový signál, aby demonstroval skutečný průběh náklonu stabilizované plochy pro řídicí algoritmus programu *Obr. 5.1*.



Obr. 5.1 Náklon plošiny okolo osy Y s průběhem odchylek a akčních veličin – pomalý nárůst náklonu základny.

Jak je vidět na *Obr. 5.1* v průběhu náklonu stabilizované plochy se projeví nezanedbatelný rozkmit hodnot jejího náklonu. Je to způsobeno jednak chybami měření, ale také funkcí akcelerometrů, které jsou snímače zrychlení. Pomocí akcelerometrů se provádí měření statického gravitačního zrychlení země v aplikaci konající dynamické pohyby. To vnáší do jejich měření určité nepřesnosti, které jsem se pokoušel minimalizovat. Z velké části se mi chyby dynamických zrychlení plošiny a chyby

samotného měření podařilo odstranit použitím gyroskopického snímače, ale nepovedlo se to však úplně.

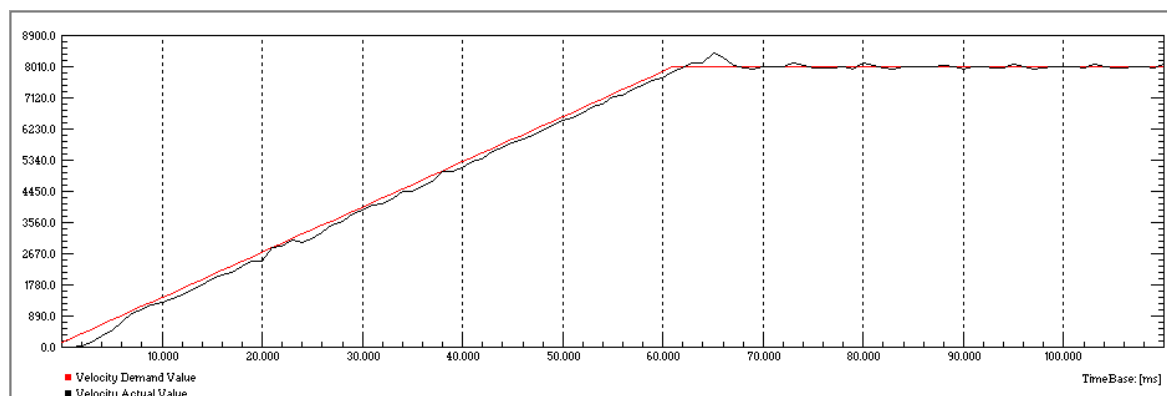
Veškeré chyby není ani možné v reálném světě odstranit, mohou se pouze minimalizovat na co nejmenší hodnoty. Nicméně pro řídicí algoritmus je takový průběh náklonu jedinou informací a postup regulace musí být vůči chybám měření a rušení odolný.

Na Obr. 5.1 jsou vyobrazeny také průběhy odchylek, které vznikají na pohybových šroubech plošiny a zároveň i průběhy akčních veličin jednotlivých motorů. Je vidět nezanedbatelný rozkmit hodnot odchylek způsobený chybami měření náklonu, který je vstupní veličinou pro jejich výpočet. Z vypočtených odchylek musí algoritmus PSD regulátoru stanovit akční veličiny motorů. Rozkmit hodnot odchylek se tedy nezanedbatelně projeví i do průběhu akčních zásahů. Ovšem nejdůležitějším faktem, který lze vyčíst z naměřených grafických průběhů je, že jednotlivým motorům se v průběhu regulace náklonu nemění směr otáčení a provádí tak posuv pohybové matice ve směru, který je po nich požadován. Algoritmus řízení je tudíž odolný vůči chybám, které vznikají v průběhu regulace a dokončí vždy pohyb na požadovanou pozici s požadovanou přesností.

Odolný vůči chybám je taktéž výpočet náklonu a to tím, že je algoritmu známo napětí U_{0g} určující nulový náklon plochy. Regulace je pak prováděna tak dlouho, dokud není zaznamenána správná hodnota napětí akcelerometru U_m a tudíž i nulový náklon stabilizované plochy. Při chybách měření algoritmus ví, díky vztahu (5.1) nebo také (4.2), zda je stabilizovaná plocha nakloněna na jednu či druhou stranu a tak je chopen provést požadovaný akční zásah ve správném směru pohybu.

$$\alpha = \frac{U_m - U_{0g}}{C_{1^\circ}} \quad (5.1)$$

Kde je α úhel náklonu [$^\circ$], U_m aktuální napětí akcelerometru [V], U_{0g} napětí akcelerometru pro rovnovážnou polohu [V] a C_{1° konstanta změny napětí snímače při jeho pootočení o 1° [V].

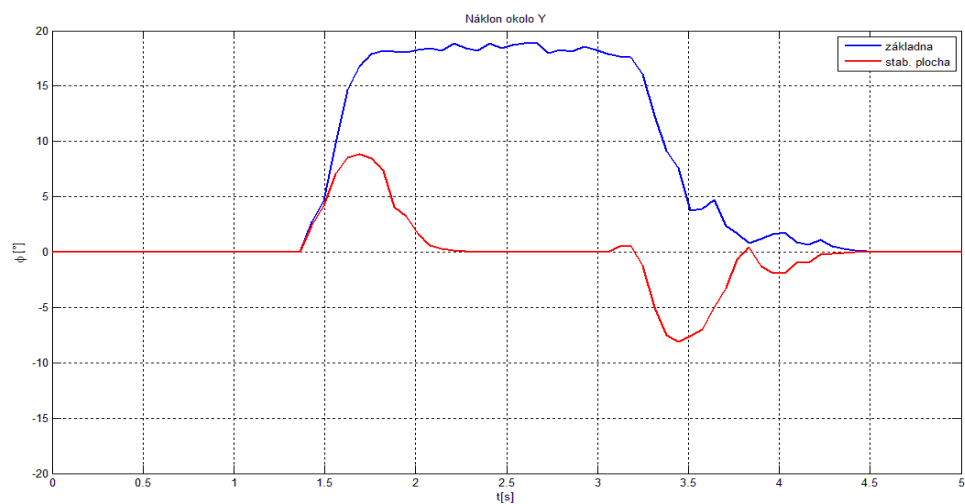


Obr. 5.2 Rozběh motoru

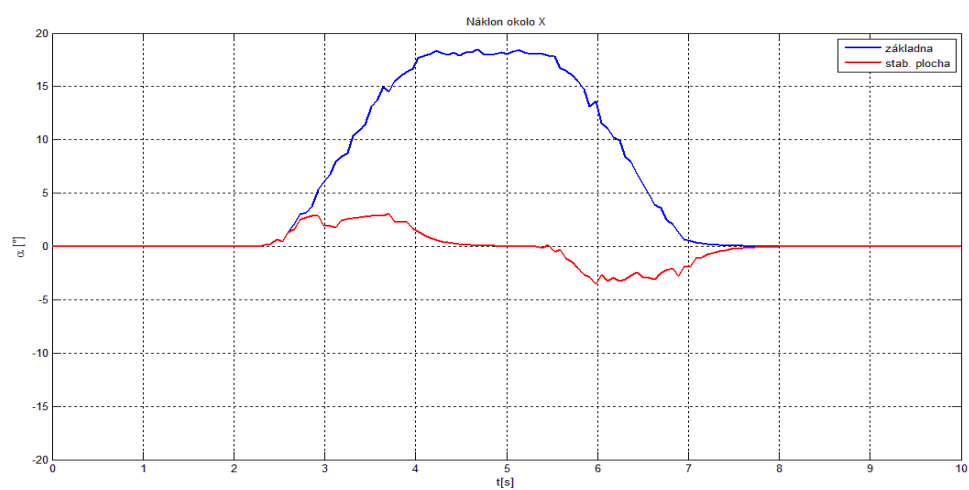
Na Obr. 5.2 je znázorněn rozběh motoru plošiny z nuly na maximální počet otáček. V případě brzdění motoru má jeho charakteristika totožný časový průběh otáček. Červeně je zobrazena žádaná hodnota otáček motoru, která vzniká v generátoru trajektorie rychlosti jednotek EPOS. Černě je pak vyobrazená skutečná hodnota otáček motoru. Při tomto rozběhu uživatel (či řídicí algoritmus plošiny) pouze zadá požadovanou hodnotu otáček a o průběh jejich regulace se postará již jednotka EPOS sama. Z naměřeného průběhu vyplývá, že rozběh motoru na maximální otáčky trvá jednu celou dobu cyklu řídicího algoritmu programu.

Další průběhy stabilizace náklonu jsou uvedeny na Obr. 5.3, Obr. 5.4 a Obr. 5.5. V případě reakce plošiny na rychlou skokovou změnu náklonu základny je možno si všimnout znatelně většího náklonu stabilizované plochy než při pomalé změně. Ovšem tento náklon je minimalizován v podstatně kratší době. Větší naklonění stabilizované plochy při rychlé změně je způsobeno zpomalením řídicího algoritmu vlivem komunikace po sériové sběrnici RS 232. Při rychlé změně průběhu náklonu viz Obr. 5.3 a Obr. 5.5 se projeví měřené hodnoty náklonu stabilizované plochy jako stabilnější a vytvoří tak rovnoměrnější průběh, než u pomalé změny náklonu stabilizované plochy viz Obr. 5.4. V případě pomalého náklonu plošina stíhá lépe regulovat polohu stabilizované plochy a vytváří při tom různé protipohyby. Tyto protipohyby způsobují pravděpodobně větší chyby měření akcelerometrů.

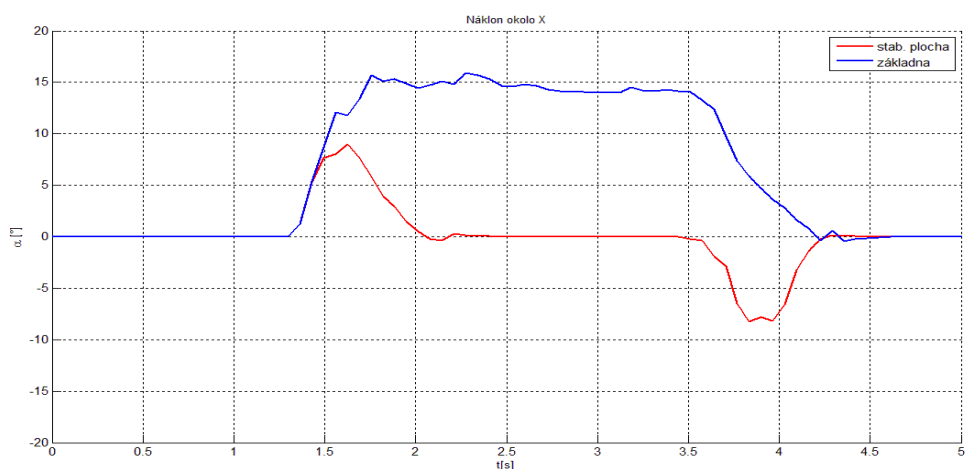
Když se uvedené průběhy náklonů převedou na vzhled obrazu kamery upevněné na plošině během stabilizace, tak náklon a vzhled obrazu je pro lidské oko naprosto dostačující. Také rozkmit průběhu náklonu se nijak neprojevuje, nebo je možná amplituda rozkmitu tak malá, že pro člověka není rozeznatelná. Testy průběhu stabilizace a jeho vlivu na obraz kamery se zabývá následující kapitola.



Obr. 5.3 Reakce na skokovou změnu náklonu okolo osy Y



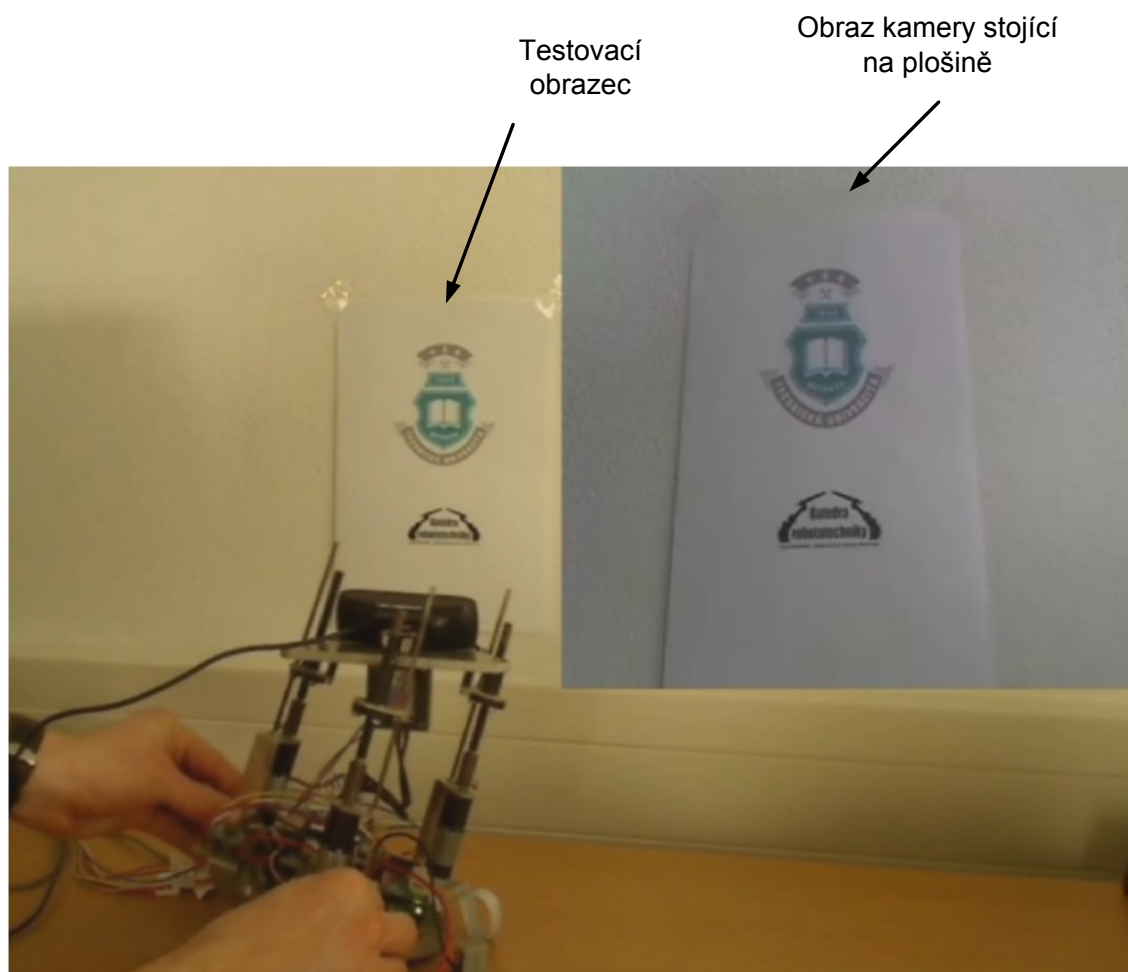
Obr. 5.4 Reakce na pomalou změnu náklonu okolo osy X



Obr. 5.5 Reakce na skokovou změnu náklonu okolo osy X

5.3 Test vlivu průběhu stabilizace na obraz kamery

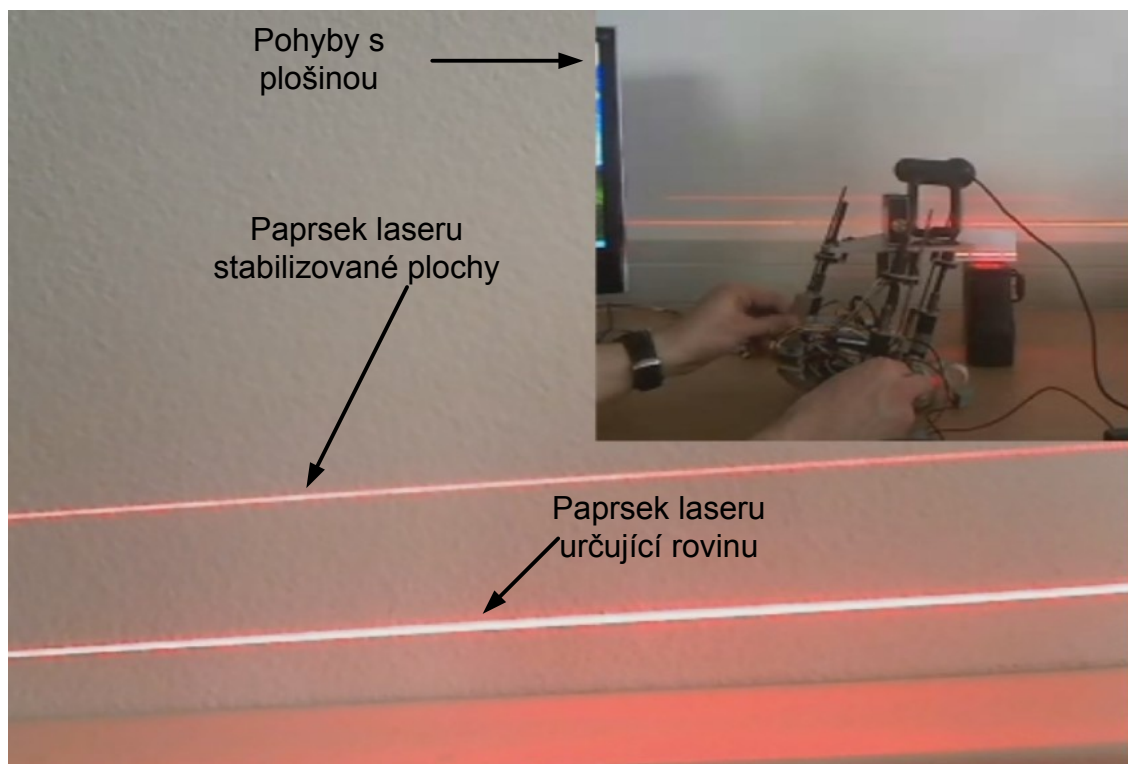
Cílem testu vlivu stabilizace na obraz kamery je prověřit vzhled obrazu kamery upevněné na plošině při jejích pohybech. Realizace testu byla poměrně jednoduchá. Před kameru byl umístěn testovací obrazec *Obr. 5.6*, po té byly s plošinou prováděny různé obecné pohyby. Vyhodnocení proběhlo opětovným přehráním obrazu kamery, na kterém byl sledován náklon a vzhled testovacího obrazce během zkoušek. Výsledek testu je pozitivní. Náklon vznikající při pohybu s plošinou je minimální a obraz kamery se dá bez problému pozorovat. Nepatrně se zde ovšem projevuje třes obrazu kamery při zahájení nebo změně směru pohybu plošiny. Důvodem tohoto třesu obrazu je rychlý a nijak netlumený záběr motorů, který způsobí trhnutí se stabilizovanou plochou. Pro zvětšení komfortu pohledu na obraz kamery je vhodné použít záznamové zařízení s integrovaným stabilizátorem obrazu. Záznam obrazu kamery je uveden v příloze na CD jako „Test vlivu stabilizace na obraz kamery.wmv“.



Obr. 5.6 Test vlivu průběhu stabilizace na obraz kamery

5.4 Test přesnosti a průběhu stabilizace

Cílem tohoto testu je zjistit skutečný průběh náklonu a chování plošiny během stabilizace. Realizoval jsem ho pomocí dvou laserových paprsků viz *Obr. 5.7*, z nichž jeden představuje rovinu a jeho zdroj je umístěn na pevné podložce, druhý je umístěn na stabilizované ploše.



Obr. 5.7 Test přesnosti a průběhu stabilizace

V průběhu testu byly s plošinou opět prováděny různé pohyby. Vyhodnocoval jsem, zda jsou laserové paprsky v rovině, či jaký je náklon paprsku stabilizované plochy v průběhu regulace. Testem bylo potvrzeno, že průběh náklonu během stabilizace není rozkmitaný, jak ukazují naměřené grafické průběhy z *Obr. 5.3*, *Obr. 5.4* a *Obr. 5.5*. Jejich rozkmit je tedy způsoben chybami měření. Video záznam testu je přiložen na CD jako „Test průběhu stabilizace.wmv“.

5.5 Negativní vlastnosti plošiny

Tak jako každé reálné zařízení má plošina své technické nedostatky a sklony k občasným chybám. První její horší vlastností je ustálení vodorovné polohy v případě zatížení závažím o větší hmotnosti než 0,4 kg. Při náklonu se bez problému začne provádět stabilizace. Ovšem při dojezdu do vodorovné pozice nastane prudké zpomalení plošiny, v případě těžšího závaží se projeví jeho snaha v pohybu pokračovat. To způsobí mírnou vibraci plošiny, kterou ale bohužel akcelerometry změří a vyhodnotí jako náклон, nastane tak mírné zakmitání okolo vodorovné polohy. Při použití větší a těžší kamery mohou nastat mírné nestability systému a mírné kmitání okolo rovnovážné polohy. Při použití běžné web kamery se tento nedostatek jednoduše vyřeší, protože její váha je malá a tudíž zanedbatelná.

Další negativní vlastností plošiny jsou reakce na větší vibrace podložky. V tomto případě opět akcelerometry vibrace měří a vyhodnocují je jako náклон. Při malých vibracích je to v pořádku díky gyroskopickému snímači, jehož výstupní napětí se udržuje na stabilní hodnotě. Ovšem v případě větších vibrací, začne být nestabilní i signál z gyroskopu, algoritmus plošiny tento signál vyhodnotí jako náклон plochy a patřičně také reaguje. Stabilizovaná plocha tedy zakmitá okolo rovnovážné polohy a opět se vyrovná.

Velkým nedostatkem zařízení je již několikrát zmiňovaný dlouhotrvající cyklus programu. Příčinou tohoto problému je komunikace mezi jednotkami EPOS a řídicím PC po sériové sběrnici RS 232, její komunikační rychlost neodpovídá potřebné rychlosti pro tuto aplikaci. Doba cyklu programu je stanovena na 65 ms a komunikace pokrývají až 60 ms z jejího času. S narůstající dobou cyklu programu klesá vzorkovací frekvence signálů snímačů, což může způsobovat občasné chyby v měření náklonu a nepředpokládané reakce plošiny. Algoritmus si zjistí a velice rychle zpracuje na začátku jeho cyklu měřené hodnoty snímačů, po té nastane výpočet odchylek a požadovaných akčních veličin, který rovněž trvá zanedbatelnou dobu. Poslední fází cyklu programu je zadat jednotkám EPOS požadované otáčky motoru a vyčíst z nich aktuální polohu pohybové matice pro kontrolu okrajových pozic. Právě tyto komunikace trvají nepřiměřeně dlouhou dobu. Při zrychlení komunikace by došlo ke zpřesnění měření náklonu a naskytla by se možnost zvládnout stabilizaci rychlých kmitavých náklonů.

6 Závěr

V rámci bakalářské práce „Stabilizační plošina“ byl řešen návrh a realizace řízení paralelní kinematické struktury. Celkově práce obsahuje tři hlavní okruhy. První z nich popisuje provedené úpravy strojní a senzorické části modelu, druhá se zabývá samotným řízením a třetí pak vyhodnocuje testy dosaženého chování stabilizační plošiny.

Na začátku řešení byla provedena analýza technických možností a předchozích dosažených výsledků jejího autora. Na základě zjištěných poznatků byly vyměněny pohybové šrouby za šrouby s větším stoupáním závitu, a to z důvodu zrychlení dynamiky plošiny. Po té bylo provedeno několik úprav senzorické části zařízení. Mezi nejvýznamnější z nich patří dovybavení senzorického subsystému o gyroskopický snímač, který zajišťuje korekci naměřených hodnot náklonu akcelerometrů. Další provedenou úpravou je použití měřicí karty pro urychlení měření hodnot snímačů a stavba frekvenčního filtru typu dolní propust pro zpřesnění výstupního signálu akcelerometrů.

Dále byl vyvinut řídicí software, který umožňuje ovládat stabilizační plošinu manuálně, nebo je schopen automaticky zajistit vodorovnou polohu stabilizované plochy při rotaci plošiny okolo os X a Y. Celý algoritmus je napsán ve vývojovém prostředí Visual Basic 2008.NET. Celkový výpis kódu programu možno nalézt v příloze této bakalářské práce.

Vyvinutý algoritmus vykazuje rychlé reakce jak na malé tak i velké změny náklonu. Ovšem při rychlejších skokových změnách náklonu se projevuje mírně zpožděná reakce plošiny. Důvody této zpožděné reakce jsou dva. První z nich se projevuje méně a jsou jim setrvačné časové konstanty motorů. Ovšem druhou hlavní příčinou mírně zpožděné reakce je prodleva mezi naměřením hodnot náklonu a zadáním akční veličiny jednotlivým pohonům. Tuto prodlevu způsobuje sériová komunikační sběrnice RS 232 použitá pro přenos dat mezi jednotkami EPOS sloužícími pro regulaci otáček pohonu a řídicím algoritmem. Pozitivní vlastností reakce na skokové změny náklonu je stanovení větší akční veličiny a tudíž i rychlejší průběh regulace. Naměřené průběhy náklonu základny a stabilizované plochy je možno vidět na *Obr. 5.1*, *Obr. 5.3*, *Obr. 5.4* a *Obr. 5.5*. Zlepšení této prodlevy by přinesla realizace propojení jednotek EPOS a řídicího algoritmu pomocí sběrnice CAN. To ovšem vyžaduje dovybavení řídicího počítače o komunikační kartu sběrnice CAN.

Jako další byly provedeny testy reálného chování stabilizační plošiny. První z nich měl za úkol vizualizovat průběh náklonu stabilizované plochy. Byl realizován pomocí dvou zdrojů laserových paprsků, které tvořily čáry promítané na zeď. Jeden z nich byl umístěn na pevné podložce a určoval tak rovinu, druhý pak na stabilizované ploše a určoval tak její náklon během průběhu stabilizace. Z testu je pořízen video záznam, který je možno nalézt na přiloženém CD. Výsledek testu odpovídá naměřeným průběhům náklonu z *Obr. 5.1*, *Obr. 5.3*, *Obr. 5.4* a *Obr. 5.5*. S jediným rozdílem a to, že se neprojevuje rozkmitaný průběh náklonu stabilizované plochy, jak je patrné z některých výše uvedených naměřených průběhů. Tím se tedy potvrdilo, že nestálý průběh naměřeného náklonu je způsoben chybami měření a zaokrouhlováním naměřených hodnot.

Druhý test reálného chování stabilizační plošiny spočíval v pozorování obrazu kamery upevněné na plošině během stabilizace. Videozáznam z testu je možno rovněž nalézt na přiloženém CD. Jeho výsledek byl pozitivní. Obraz ze stabilizované kamery je pro lidské okno naprosto dostačující. Na záznamu je vidět drobný třes obrazu při rozjezdu a zastavení stabilizované plochy. To je způsobeno nijak netlumeným a poměrně rychlým rozjezdem a zabrzděním pohonů. Tento nedostatek by mělo bez problému vyřešit použití kamery se zabudovaným stabilizátorem obrazu.

7 Použitá literatura

- [1] ŠPAČEK, P. *Návrh a realizace řízení paralelní kinematické struktury*. Ostrava: katedra Robototechniky VŠB-TUO, 2007, 60 s. Diplomová práce, vedoucí: Novák, P.
- [2] MAXON MOTOR. *EPOS Windows 32-bit DLL* [online]. Switzerland, 2007 [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < <http://www2.maxonmotor.com/page040212.cfm?itemID=247> > .
- [3] MAXON MOTOR. *EPOS 24/1 Getting Started* [online]. Switzerland, 2007 [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < <http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/EPOS-Getting%20Started-E.pdf> >.
- [4] MAXON MOTOR. *EPOS 24/1 Hardware Reference guide* [online]. Switzerland, 2007 [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < <http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/EPOS-Hardware%20Reference%20-E.pdf> >.
- [5] MAXON MOTOR. *EPOS 24/1 Firmware specification* [online]. Switzerland, 2007 [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/EPOS_Firmware_Specification_E.pdf >.
- [6] ICSSENSORS. *Products Databook* [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < http://nees.berkeley.edu/Facilities/pdf/Instrumentation/ic_sensors_catalog.pdf >.
- [7] SNAIL INSTRUMENTS. *ACC 7260* [online]. [cit. 2011-05-02]. katalogový list modulu. Dostupný z WWW: < <http://shop.snailinstruments.com/docs/acc7260.pdf> >.
- [8] HÁJEK, K.; SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [9] HUMUSOFT. *Hudaq MF 624* [online]. [cit. 2011-05-02]. uživatelský manuál. Dostupný z WWW: < <http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/mf624um.pdf> >.
- [10] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MMA 7260QT* [online]. [cit. 2011-05-02]. katalogový list senzoru. Dostupný z WWW: < http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf >.
- [11] POLOLU. *Pololu 1266* [online]. [cit. 2011-05-02]. katalogové informace modulu. Dostupný z WWW: < <http://www.pololu.com/catalog/product/1266%20target=> >.
- [12] VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008. 250 s. ISBN 978-80-248-1924-2.
- [13] NOVÁK, P. *Mikropočítačové řídicí systémy*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. 112 s. ISBN 80-248-0219-8
- [14] BALÁTE, J. *Automatické řízení*. BEN: Praha, 2004. 664 s. ISBN 80-7300-148-9

Příloha A

Struktura a obsah přiloženého CD

/přílohy/Výpis kódu programu.pdf	Kód vyvinutého softwaru
/software/ Řízení stabilizační plošiny/*.*	Software pro řízení stabilizační plošiny
/video/ Test vlivu stabilizace na obraz kamery.wmv	Videozáznam z testu
/video/ Test průběhu stabilizace.wmv	Videozáznam z testu
/video/ Testy zkrácená verze prezentace.wmv	Zkrácený video záznam z obou testů
/foto/*.jpg	Fotodokumentace stabilizační plošiny
/přílohy/Bakalářská práce.pdf	Text této bakalářské práce v elektronické podobě
/katalogové listy/motor.pdf	Katalogový list motoru plošiny
/katalogové listy/převodovka.pdf	Katalogový list převodovky motoru plošiny